DIEGO KELLERMANN HURTADO

# AVALIAÇÃO DA CONTRAÇÃO E DO EMPENAMENTO DE PLA E PA66 INJETADOS EM MOLDE DE FABRICAÇÃO RÁPIDA (VRE) E EM MOLDE METÁLICO

Atena Editora
Ano 2023

DIEGO KELLERMANN HURTADO

# AVALIAÇÃO DA CONTRAÇÃO E DO EMPENAMENTO DE PLA E PA66 INJETADOS EM MOLDE DE FABRICAÇÃO RÁPIDA (VRE) E EM MOLDE METÁLICO

Atena Editora
Ano 2023

**Editora chefe**
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
**Editora executiva**
Natalia Oliveira
**Assistente editorial**
Flávia Roberta Barão
**Bibliotecária**
Janaina Ramos
**Projeto gráfico**
Camila Alves de Cremo
Ellen Andressa Kubisty
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
**Imagens da capa**
iStock
**Edição de arte**
Luiza Alves Batista

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

# Avaliação da contração e do empenamento de PLA e PA66 injetados em molde de fabricação rápida (VRE) e em molde metálico


**Diagramação:** Thamires Camili Gayde
**Correção:** Maiara Ferreira
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga
**Revisão:** O autor
**Autor:** Diego Kellermann Hurtado

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

H967 Hurtado, Diego Kellermann
Avaliação da contração e do empenamento de PLA e PA66 injetados em molde de fabricação rápida (VRE) e em molde metálico / Diego Kellermann Hurtado. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-1491-9
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.919231807

1. Manufatura aditiva. 2. Moldagem por injeção. 3. PLA (ácido polilático). 4. PA66 (poliamida 66). 5. Molde de fabricação rápida (VRE). I. Hurtado, Diego Kellermann. II. Título.

CDD 671.51

**Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166**

**Atena Editora**
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

# DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

Este trabalho é dedicado aos meus pais, família e amigos

*"A man may die, nations may rise and fall, but an idea  lives on"*

(John F. Kennedy)

# AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a UFSC por toda a infraestrutura, ao POSMEC pelo apoio e recursos cedidos ao trabalho, ao CNPq pela bolsa de estudos.

Ao professor Carlos Henrique Ahrens pela orientação, paciência e motivação.

Ao professor Fernando Luís Peixoto pela co-orientação, ajuda na parte experimental e experiência adicionada ao trabalho.

Ao professor Gean Salmoria pelo apoio para realizar a usinagem dos insertos de resina.

Aos colegas e amigos do laboratório CIMJECT:

Diogo Pfeifer, Luiz Fernando Vieira, Roberto Pistorello, Vitor Henschel, André Eccel, André Germanovix, Andrés Gonzales, Edna Vieira, Raphael Melo, Liliane Melo, Felipe Castro, Manoella Solano, Eduardo Pires, Aloysio Fogliatto, Fabíola Rosa, Marcos Vinícius, Guilherme Bevilaqua, Emanuelle Chiesa, Philippi Rachadel, Isaddora Fontenelle, Rafael Storm.

À minha família que sempre me apoiou durante o período do mestrado.

A todos que contribuíram de todas as formas na realização deste trabalho.

RESUMO

Um dos principais defeitos que ocorre em peças moldadas por injeção é o empenamento decorrente da contração não homogênea durante o resfriamento da peça no molde e após a desmoldagem da peça do molde. Em se tratando de moldes metálicos a utilização de *softwares* de auxílio ao projeto (CAE) já vem sendo considerada uma prática comum para avaliar e investigar formas de reduzir ou mesmo eliminar o empenamento de peças poliméricas moldadas por injeção. Com o advento das técnicas de manufatura rápida, o uso de moldes protótipos (insertos) fabricados por vazamento de resina epóxi (VRE) tem sido empregado no processo de desenvolvimento de produtos poliméricos como uma alternativa para a produção de pequenas quantidades de peças ou produção piloto. Apesar disso, estudos focados no entendimento do empenamento de peças moldadas neste tipo de molde são praticamente inexistentes. Este trabalho investigou o empenamento e a contração de peças (corpos de prova retangulares) injetadas em PLA, e PA66 em um molde VRE e em molde de aço SAE 1045 mediante comparações realizadas através de simulações em um software CAE e resultados de moldagem obtidos da prática. O empenamento foi avaliado através de estudos da influência da espessura da peça (valores de 2,5; 3,0 e 3,5 mm) e da temperatura do molde (baixo, médio e alto, em conformidade com cada polímero). Os resultados de simulação, para ambos os tipos de moldes indicaram que, para mesmo valor de temperatura do molde, as peças em PLA apresentaram uma leve tendência de apresentar maiores empenamentos para maiores valores de espessura. Os resultados também mostraram que, para mesmos valores de espessura da peça, o empenamento das peças simuladas em PA66 aumentou na medida em que foram utilizadas temperaturas de molde mais elevadas. Para as peças de 3 mm de espessura injetadas experimentalmente em PLA no molde VRE os resultados mostraram ter havido um aumento significativo do empenamento quando foi empregada a maior temperatura do molde (em torno de 50°C) quando comparado ao molde metálico. Os resultados de empenamento das peças injetadas em molde VRE e metálico para a PA66 não mostraram diferenças significativas entre as temperaturas de 40°C e 70°C. Já na média temperatura do molde ocorreu um aumento significativo de quase duas vezes do empenamento para o molde VRE. Nas peças de PLA injetadas em VRE, notou-se que ocorreu um aumento significativo da contração transversal com o aumento da temperatura do molde. Nas peças injetadas em PA66, quando se compara os valores da contração transversal dos dois materiais do molde, verificaram-se valores significamente maiores de contração nas peças injetadas em VRE.

**PALAVRAS-CHAVE**: Empenamento, contração, biopolímero, molde VRE

ABSTRACT

One of the main defects that occur in injection molded parts is warpage due to non-uniform shrinkage during part of the cooling in the mold and after demolding of the mold part. In the case of metal molds using aid design software (CAE) is already considered a common practice to assess and investigate ways to reduce or even eliminate the warping of polymer injection molded parts. With the advent of rapid manufacturing techniques, the use of molds prototypes (inserts) manufactured by casting epoxy resin (VRE) has been employed in polymer product development process as an alternative to the production of small quantities of parts or pilot production. Nevertheless, no studies have focused understanding to warpage of molded parts this type of mold are practically non-existent. This work investigated the warping and parts of contraction (rectangular test pieces ) injected into PLA and PA66 in VRE mold and steel mold SAE 1045 through comparisons made through simulations in hum software CAE and molding results obtained in practice. The warping was valued through the thickness influence studies (values of 2.5 , 3.0 and 3.5 mm) and the mold temperature (low , medium and high , according to each polymer). The simulation results indicating that the PLA parts warpage was higher for higher thickness values. The results also showed that the increase in surface temperature of the mold increased warping of the simulated parts of PA66. For molded parts experimentally in PLA, a significant increase of warpage was employed when a higher mold temperature (around 50 ° C) in VRE compared to the metal mold. The results of warpage of molded parts in VRE and metal mold to PA66 showed no significant differences between the temperatures of 40 ° C and 70° C. The average temperature of the mold there is a significant increase of almost twice the warpage in VRE mold relative to the metal. In the VRE in molded parts, it is noted that there is a significant increase in transverse shrinkage by increasing the mold temperature. The parts injected into PA66, when comparing the values of the transverse contraction of the two materials of the mold were significantly greater shrinkage values for the injection molded parts VRE.

**KEYWORDS**: Warpage, shrinkage, biopolymer, casting resin tool

SUMÁRIO

SUMÁRIO

# LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CAD | Computer Aided Design – Desenho Assistido por Computador |
| CAE | Computer Aided Engineering – Engenharia Assistida por Computador |
| CIMJECT | Laboratório de Projeto e Fabricação de Componentes |
| CNC | Controle Numérico Computacional |
| P20 | Aço AISI P20 |
| PA | Poliamida |
| PA66 | Poliamida 66 |
| PB | Polibutileno |
| PP | Polipropileno |
| PP | Polipropileno |
| PS | Poliestireno |
| PMMA | Polimetilmetacrilato |
| PBT | Polibutileno Tereftalato |
| PS | Poliestireno |
| PLA | Poli(ácido láctico) |
| RT | Rapid tooling – Ferramental Rápido |
| VRE | Vazamento de Resina Epóxi |

# LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---|---|
| $T_g$ | Temperatura de transição vítrea |
| $T_m$ | Temperatura de fusão |
| $T_W$ | Temperatura da superfície do molde |
| $\Delta v$ | Diferença de volume específico entre o estado líquido e o estado sólido |

# INTRODUÇÃO

O processo de moldagem por injeção é um dos mais importantes na indústria de produção de transformados de plásticos no Brasil. Segundo dados da Abiplast (2012), ocupa a segunda colocação entre os processos de fabricação utilizados no segmento das indústrias de transformação de plásticos.

Em escala industrial, o processo de moldagem por injeção é realizado, predominantemente, empregando-se moldes metálicos para conferir o formato da peça desejada. Contudo, no processo de desenvolvimento de novos produtos injetados muitas empresas estão buscando alternativas para a fabricação de moldes mais baratos e em menor tempo, antes da fabricação do molde metálico que efetivamente será utilizado na produção em larga escala. Segundo Cavalheiro (2007), neste contexto, surgiram as técnicas de fabricação rápida de ferramentas de conformação e moldagem, também conhecidas por *Rapid Tooling* (RT), como a técnica de fabricação de moldes por vazamento de resina epóxi (VRE). Com este tipo de molde, o novo produto em desenvolvimento pode ser avaliado rapidamente mediante a moldagem de um lote-piloto de peças com o mesmo material polimérico do produto final a ser injetado no molde metálico.

Um dos principais defeitos que ocorre em peças poliméricas moldadas por injeção é o empenamento decorrente da contração não homogênea durante o resfriamento da peça no molde e após a desmoldagem da peça do molde. Fatores como tipo de material polimérico, geometria da peça e parâmetros de processamento utilizados na moldagem são apontados por pesquisadores, como elementos que podem contribuir de forma efetiva para o surgimento deste tipo de defeito em peças injetadas (LEÃES, 2008).

Em se tratando de moldes metálicos a utilização de softwares de auxílio ao projeto (CAE) já vem sendo considerada uma prática comum para avaliar e investigar formas de reduzir o empenamento de peças poliméricas moldadas por injeção. Com o surgimento de novos materiais poliméricos e o crescimento do interesse por produtos de plástico confeccionados em biopolímero, como o PLA, estudos focados em avaliar defeitos de peças injetadas em moldes VRE podem auxiliar na consolidação desta tecnologia como alternativa para o setor de transformação de plásticos.

## OBJETIVOS

### Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho consiste e avaliar o empenamento e contração dos termoplásticos semi-cristalinos, PLA e PA66 moldados por injeção em moldes fabricados por vazamento de resina epóxi (VRE).

## Objetivos Específicos

Mediante análises comparativas de moldagens realizadas em molde metálico, o trabalho tem como objetivos específicos:

- Avaliar a influência da espessura de parede do molde no empenamento, por meio de *software* CAE, para os materiais PLA e PA66;
- Avaliar a influência da temperatura do molde no empenamento e na contração para os materiais PLA e PA66, injetados experimentalmente em molde VRE e aço 1045.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## MOLDAGEM POR INJEÇÃO

O processo de moldagem por injeção é mundialmente utilizado na indústria de plásticos. Basicamente todos os tipos de polímeros, conhecidos também como resinas, podem ser utilizados. A lista cresce a cada ano e inclui todos os termoplásticos, alguns elastômeros e termofixos (SELLÉS, 2014).

A moldagem por injeção consiste basicamente em aquecer a matéria-prima polimérica até um estado, relativamente fluido, que deve ser empurrado (injetado) sob pressão para dentro da cavidade de um molde até que o material se solidifique (HARADA, 2012).

Resumidamente, uma máquina injetora possui duas partes: a unidade de injeção e a unidade de fechamento. A unidade de injeção fundi, dosa, e injeta o material na velocidade e pressão programadas para dentro do molde.  Já a unidade de fechamento comporta o molde que contém a cavidade e deverá movimentá-lo (abrir e fechar), conforme Figura 1. O molde fica fechado para suportar a pressão e é aberto para extrair a peça.

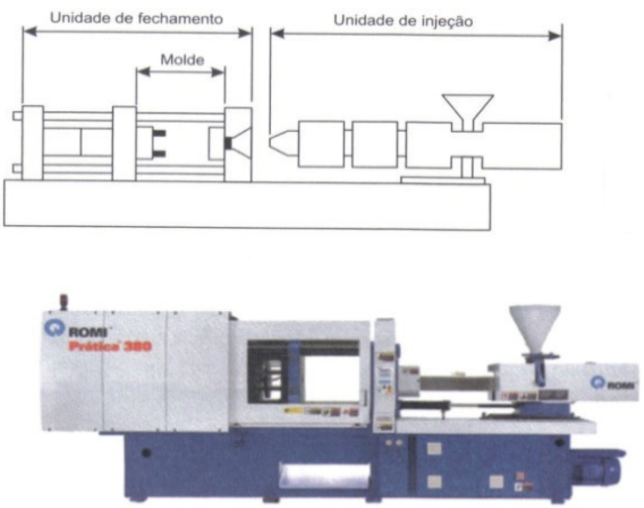



Figura 1 - Máquina injetora.

Fonte: Adaptado de Harada (2012).

A unidade de injeção (Figura 2) é composta por:

a. Funil alimentador: Entrada do polímero na injetora na forma de *pellets* (granulado), em alguns funis já ocorre o pré-aquecimento do material;

b. Cilindro ou canhão: Recebe o material do funil e é onde se dá a plastificação;

c. Rosca: Promove o transporte do material e efetua a força de cisalhamento sobre este, que junto com as resistências elétricas realizam a fundição do material.

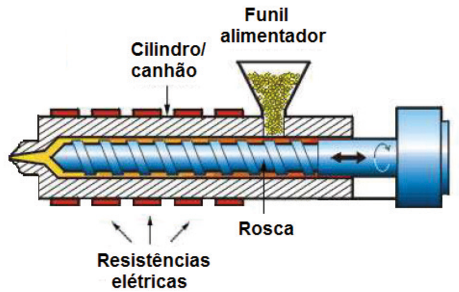



Figura 2 - Principais componentes da unidade de injeção.

Fonte: Adaptado de Viana e Martins (2008).

A unidade de fechamento (Figura 3) é composta por:

a. Placa base (também chamada de placa fixa): Contém a parte fixa do molde, onde ocorre a entrada do material fundido da unidade de injeção para dentro da cavidade;

b. Placa móvel: Responsável pela abertura do molde para a extração da peça.

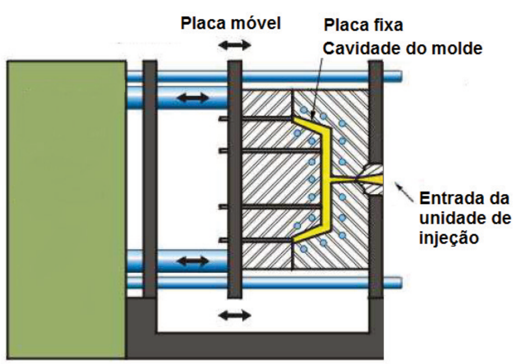



Figura 3 - Desenho esquemático da unidade de fechamento.

Fonte: Adaptado de Viana e Martins (2008).

O ciclo de operações na moldagem por injeção é descrito por Blass (1985) de acordo com as seguintes operações:

a. Fechamento do molde;

b. O parafuso avança, injetando material no molde pela entrada da unidade de injeção (bico);
c. O parafuso permanece na posição avançada durante um tempo pré-determinado pela natureza do material, e pelo tamanho e forma do moldado;
d. O parafuso é retraído, e a carga seguinte do material é alimentada ao cilindro (dosagem); enquanto isso, o molde permanece fechado até que o moldado tenha resfriado o suficiente para que possa ser removido sem distorção;
e. O molde abre, a peça é extraída e o ciclo de operações pode, então, ser repetido.

De acordo com Malloy (2010), o processo de moldagem por injeção é geralmente usado para produzir peças que têm requisitos de tolerância dimensionais bastante apertados. Neste contexto, se enquadram peças plásticas que devam se encaixar umas as outras, do tipo conjuntos macho/fêmea e que não podem apresentar contrações ou empenamento.

O processo de moldagem por injeção pode fabricar peças com excelentes padrões dimensionais. Segundo Ress (1995), pode ser relativamente fácil alcançar tolerâncias de projeto de peças fabricadas em moldes metálicos, entretanto peças plásticas não dependem unicamente das dimensões do molde. Uma contração não uniforme na moldagem é um fenômeno indesejável, pois pode levar a uma maior dificuldade em atingir as dimensões de projeto, resultar em empenamento, quando as tensões internas causadas pela contração não homogênea forem suficientes para causarem deformação na peça.

Moldes fabricados em materiais não convencionais como o de VRE, podem ser mais difíceis alcançar tolerâncias de projeto, pois a baixa condutibilidade térmica do material do molde pode influenciar contrações dimensionais e empenamento das peças.

## FABRICAÇÃO DE INSERTOS POR VAZAMENTO DE RESINA EPÓXI (VRE)

O processo de fabricação de insertos (cavidades do molde) para moldes de injeção de plásticos por vazamento de resina epóxi (VRE) é uma prática corrente na produção de protótipos no desenvolvimento de produtos. Além disso, os moldes protótipos podem ser fabricados por processos de usinagem, que retiram material de um bloco sólido permitindo criar geometrias complexas e com boa precisão (DERENIEVICKI, 2007).

Além do processo direto (usinagem), de acordo com Peixoto (2009), a fabricação por VRE pode ser feita por processo indireto e necessita de um modelo. Este modelo deve ser produzido para que se tenha maior precisão, estabilidade dimensional e facilidade no acabamento na superfície, para obter-se maior facilidade de fabricação e melhor acabamento do molde. Nestes processos indiretos, pode-se utilizar a manufatura aditiva para a fabricação dos modelos que será a base para a fabricação dos moldes. A partir do modelo pronto é feita uma série de etapas posteriores particulares para cada método.

Mesmo com estas etapas posteriores, consegue-se um tempo de fabricação mais curto do que o convencional, porém com menor precisão dimensional (CAVALHEIRO, 2007).

A Figura 4 mostra as etapas de fabricação indireta de insertos macho e fêmea. De acordo com Cavalheiro (2007), esta etapa é realizada, resumidamente da seguinte forma:

Posiciona-se um modelo (geralmente fabricado por manufatura aditiva) sobre a base de uma moldura de madeira. Sob vácuo (minimizar a presença de bolhas) a resina epóxi é misturada com o agente de cura. Realizada a cura da resina (aproximadamente 24 horas), a moldura é invertida e a base é removida. É montada uma nova moldura e é despejada a resina nos espaços vazios. Terminado o processo de cura do segundo lado o molde é aberto e o modelo é retirado.

Uma das principais diferenças entre insertos fabricados em resina epóxi e insertos metálicos é a diferença de condutibilidade térmica desses materiais. A resina epóxi com carga de alumínio possui condutividade térmica próxima de 0,78 $W.m^{-1}.°C^{-1}$, enquanto um molde metálico em AISI P20 tem aproximadamente 29 $W.m^{-1}.°C^{-1}$. Essa propriedade é de fundamental importância na moldagem por injeção, pois influencia no tempo de ciclo e nas propriedades das peças injetadas (SABINO NETTO, 2008).

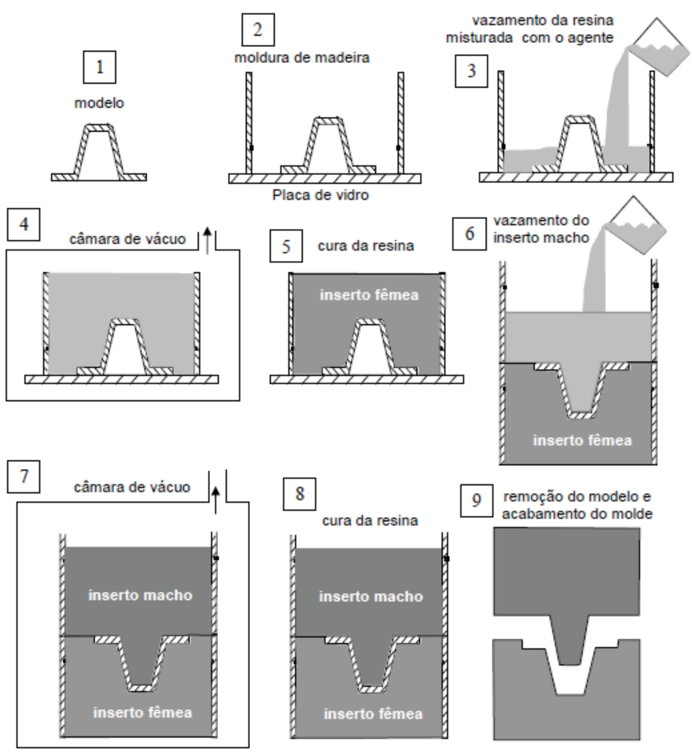



Figura 4 - Etapas de fabricação indireta de insertos para moldes de injeção.

Fonte: Adaptado de Cavalheiro (2007).

Outra característica importante dos moldes fabricados por VRE é número de peças injetadas que o molde é capaz de produzir sem sofrer avarias significativas. Para peças com geometria relativamente simples os moldes em resina são capazes de produzir até 1000 peças e com geometria complexa até 50 peças (SARAIVA e SOARES, 2004; FERREIRA e MATEUS, 2003; AHRENS *et al*, 2007). Jesus (2005) verificou o aumento da condutividade térmica e da vida útil dos moldes fabricados por VRE em função do aumento da quantidade de carga metálica incorporada.

## CONTRAÇÃO DE PEÇAS MOLDADAS POR INJEÇÃO

Quando um polímero cristalizável fundido é resfriado, é iniciada a cristalização em núcleos individuais que se desenvolvem radialmente, formando os esferulitos (CANEVAROLO, 2002). A estrutura dos esferulitos é composta por lamelas na forma de feixes, que crescem radialmente a partir de um núcleo central, interligados pela fase amorfa. No crescimento, as lamelas se dobram sobre elas próprias, com as dobras ocorrendo nas faces, essa estrutura é chamada de modelo da cadeia dobrada, Figura 5 (CALLISTER, 2007).

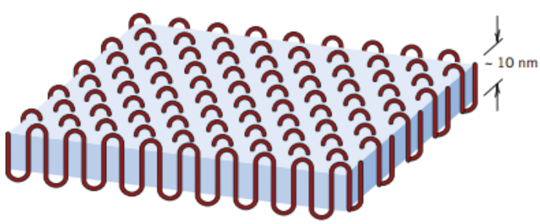



Figura 5 - Estrutura da cadeia dobrada para um cristalito polimérico em forma de placa.

Fonte: Callister (2007).

Um polímero semicristalino consiste em pequenas regiões cristalinas (cristalitos), entre as quais, estão as regiões amorfas compostas por moléculas com orientação aleatórias, Figura 6 (CALLISTER, 2007).

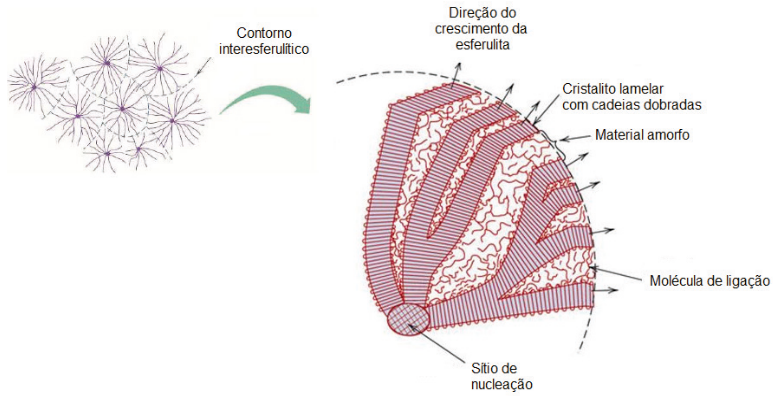



Figura 6 - Representação esquemática da estrutura esferulítica.

Fonte: Adaptado de Callister (2007).

Os materiais termoplásticos são classificados em semicristalinos e amorfos. Em geral, os materiais semicristalinos apresentam uma contração maior que os amorfos. Esta diferença é devida ao fato de que no resfriamento a estrutura molecular dos materiais semicristalinos permite que suas cadeias se ordenem melhor a ponto de formar outra fase, a fase cristalina. Com maior empacotamento, a região cristalina é mais densa que a fase amorfa restante (HARADA, 2012). Já para os polímeros não cristalinos, mantêm a estrutura amorfa mesmo a temperaturas muito baixas. Devido a este fato resulta em uma contração geral muito menor nesses materiais, quando comparado aos semicristalinos, e consequentemente diminuição do volume específico (HARADA, 2012). A alteração no volume durante a fase líquido e sólido é observada na Figura 7.

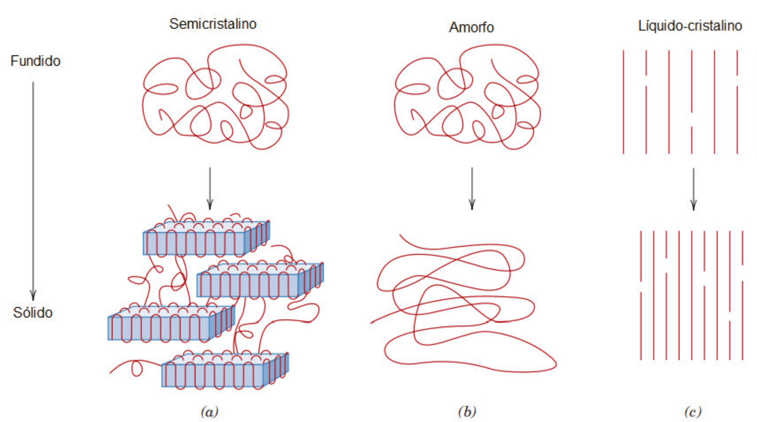



Figura 7 - Representação esquemática da estrutura molecular no estado fundido e sólido para (a) semicristalino, (b) amorfo, (c) líquido-cristalino.

Fonte: Adaptado de Callister (2007).

A contração dimensional de um termoplástico é um fenômeno típico na moldagem por injeção, causada pela contração volumétrica, durante e depois do ciclo de moldagem (LATI, 2008). Geralmente, existem três estágios de contração em um produto moldado por injeção: contração no molde (contração durante o resfriamento), contração logo após a abertura do molde e pós-contração (causada pelo envelhecimento físico, recristalização) (HASSAN, 2010).

De acordo com Rahimi (2014), a contração é um fenômeno não desejável no processo de moldagem por injeção porque ocasiona mudanças dimensionais e consequentemente, peças de baixa qualidade. A Figura 8 mostra a contração da peça após ser desmoldada e resfriada.

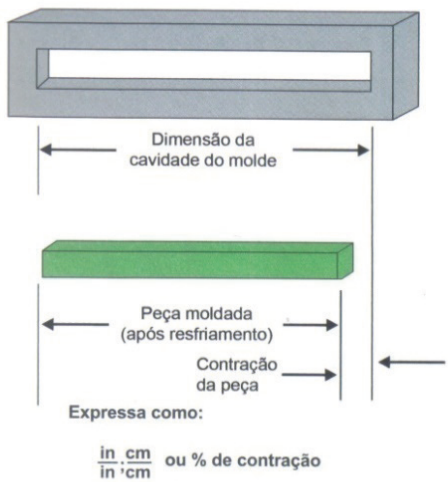



Figura 8 - Conceito de contração no molde.

Fonte: Harada (2012).

Segundo a norma ASTM D955, a diferença entre as dimensões da cavidade e da peça moldada pode variar de acordo com o projeto do molde e operação do processo de moldagem. Fatores intrínsicos ao molde (material do molde, geometria da cavidade), ao material polimérico (amorfo ou semi-cristalino) e ao processo de moldagem (temperatura de fusão da massa polimérica, tempo de preenchimento e condições de recalque) podem afetar significativamente a contração.

O comportamento da contração pode ser explicado pelo diagrama pressão-volume-temperatura do material (HASSAN, 2010). A diferença de volume específico entre o estado líquido e o estado sólido (Δv) para polímeros amorfos e semicristalino é mostrada na Figura 9, onde a diferença da curva pvT destes materiais é bastante evidente.

Nos materiais semi-cristalinos, além da mudança de inclinação da curva, verifica-se

também uma mudança repentina no volume específico, devido à cristalização do material, a qual ocorre na temperatura de transição vítrea (Tg) (HARADA, 2012).

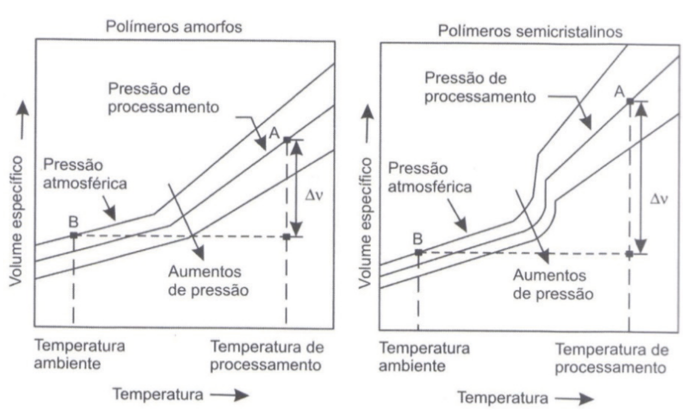



Figura 9 - Curvas pvT para polímeros amorfos e semicristalinos e a variação de volume específico (Δv) e a variação de temperatura durante o processamento.

Fonte: Harada (2012).

Segundo Leães (2008), após serem removidos do molde, os materiais semicristalinos continuam a construir estruturas cristalinas por algum tempo. A mudança de estrutura do momento em que a peça sai do molde até 48 horas não é tão grande quanto a que ocorre dentro do molde, porém deve ser considerada (LEÃES, 2008).

Durante a fase de resfriamento em que a peça se encontra na cavidade do molde, a ocorrência da contração é impedida mecanicamente pelas paredes da cavidade. Deste modo, ao invés de ocorrer deformação, surgem às tensões residuais que são causadas pelas diferenças de perfis de temperaturas (LEÃES, 2008).

Peças moldadas por injeção geralmente possuem contração anisotrópica, isto significa que haverá uma diferença na contração na direção do fluxo e no sentido transversal (ANDREW, 2013). Durante a etapa de preenchimento do molde, o grau de orientação transmitida à massa fundida tem uma grande influência sobre a contração exibida pelo material plástico. Durante o preenchimento da peça no molde, as moléculas do polímero são submetidas a um alongamento que resulta na orientação molecular e comportamento da contração anisotrópica como mostrado na Figura 10 (MALLOY, 2010). Materiais plásticos puros tendem a encolher mais ao longo da direção do fluxo em relação à direção perpendicular, enquanto os materiais reforçados estão restritos ao longo da direção da orientação das fibras.

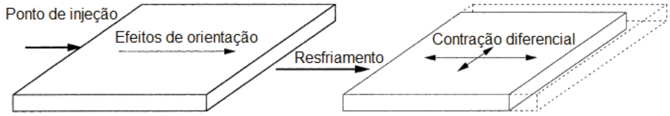



Figura 10 - Efeitos da orientação do fluxo sobre uma peça moldada. Malloy (2010).

## EMPENAMENTO EM PEÇAS INJETADAS

Muitos materiais plásticos exibem elevados valores de contração e, nem sempre a contração é isotrópica (uniforme). Se um material plástico exibir um comportamento de contração anisotrópica, não será apenas um encolhimento da peça. A peça irá sofrer certo grau de empenamento ou tensão interna (MALLOY, 2010).

Segundo Fischer (2003), o empenamento de uma peça polimérica moldada por injeção é uma distorção da forma final da peça causada pela contração diferencial, isto é, se uma peça sofre um diferente grau de contração em outra área ou direção, a peça irá empenar.

Uma variedade de fatores são responsáveis pelo complexo comportamento de variação não uniforme da peça plástica moldada, entre estes fatores estão (MALLOY, 2010):

- Encolhimento assimétrico devido a um arrefecimento não uniforme da peça;
- Contração volumétrica não uniforme;
- Comportamento anisotrópico do material devido ao fluxo de orientação induzido;
- Tensão diferencial térmica devido a efeitos da geometria.

De acordo com Alves (2008), por causa da contração não uniforme, a peça vai contrair em diferentes planos e espessuras, causando o empenamento. Segundo esta mesma autora, essas variações de encolhimento geram tensões residuais que são capazes de superar a resistência mecânica da peça, resultando em distorção. O empenamento provoca dobramento ou torção e altera não apenas as dimensões, mas também contornos e ângulos da peça (FISCHER, 2003). A Figura 11 ilustra duas configurações de empenamento que podem resultar da moldagem, o tipo cela e domo.

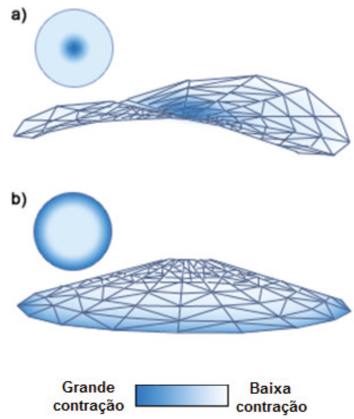



Figura 11 - Empenamento do tipo sela (a) e domo (b).

Fonte: Adaptado de Moldflow (2012).

O empenamento do tipo sela é causado tanto pela contração na região interna do disco ser mais elevada do que a região externa ou a contração perpendicular ser menor do que a paralela. Já para o tipo domo, ocorre quando a contração da região externa ser maior do que a região interna. A circunferência do disco reduz enquanto o raio tenta manter constante (MOLDFLOW, 2012).

De acordo com Moldflow (2012), somente a contração não causa o empenamento. Uma grande uniformidade de contração gera uma peça com sua forma perfeita, porém com suas dimensões reduzidas. Segundo Harada (2012), para alcançar uma contração baixa e uniforme deve-se considerar vários fatores e a interação deles tais como: orientações moleculares e de fibras, o resfriamento desequilibrado nas diversas partes do molde/cavidade, as configurações da peça e do molde (curvaturas, variação de espessura, tamanho, ponto de injeção, entre outros) e ainda as condições do processo.

Programas de simulação do tipo CAE podem ser utilizados por projetistas de peças plásticas como ferramenta de projeto para diminuir potenciais contrações e empenamento muito antes da peça ser fabricada (MALLOY, 2010).

## Tensões residuais

Durante a fase de resfriamento onde a peça se encontra dentro do molde, a ocorrência do empenamento e encolhimento é impedida mecanicamente pelas paredes do molde. Ao invés de ocorrer deformação, surgem tensões residuais (LEÃES, 2008).

Pötsch e Michaeli (1995), afirmam que a principal causa das tensões residuais são as diferentes taxas de resfriamento nas camadas da seção transversal de uma peça moldada. As tensões residuais são um processo induzido de tensões que persiste mesmo depois de

uma peça ser moldada. Estas tensões são normalmente balanceadas, isto significa que em toda a espessura da peça as tensões de tração e compressão irão anular as tensões residuais (ALVES, 2008).

A Figura 12 mostra a distribuição da tensão residual e temperatura ao longo da espessura em uma peça com resfriamento uniforme e não uniforme (empenada).

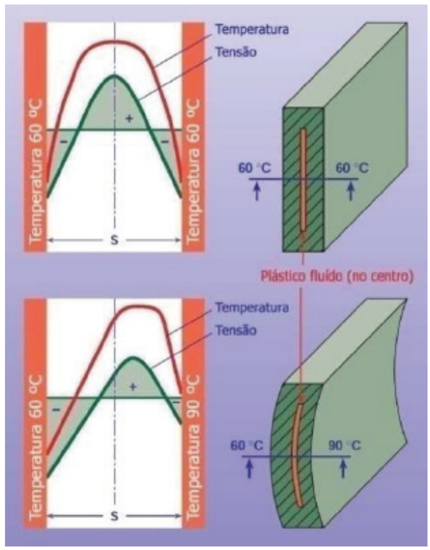



Figura 12 - Distribuição da tensão residual e temperatura ao longo da espessura em uma peça com resfriamento uniforme e não uniforme.

Fonte: Zöllner *apud* Pistorello (2012).

Segundo Leães (2008), em algumas situações, as tensões residuais podem ser benéficas ou prejudiciais. Tensões residuais compressivas na superfície da peça podem prevenir a abertura de trincas, aumentando a resistência à fadiga. De outro modo, quando tensões causadas por carregamentos externos são adicionadas à tensão residual, a deformação plástica irá iniciar a um carregamento mais baixo.

Também tem influência na formação das tensões residuais a temperatura da parede da cavidade do molde ($T_W$). Quando a $T_W$ é menor, há maior gradiente de temperatura e consequentemente maior tensão residual.

## FATORES QUE AFETAM A CONTRAÇÃO E O EMPENAMENTO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

A contração e o empenamento de uma peça plástica injetada podem ser influenciados por uma variedade de fatores como: materiais, geometria da peça, projeto do molde e fatores relacionados ao processamento. Alguns dos fatores relacionados ao controle dimensional das peças plásticas são mostrados na Figura 13 (MALLOY, 2010):

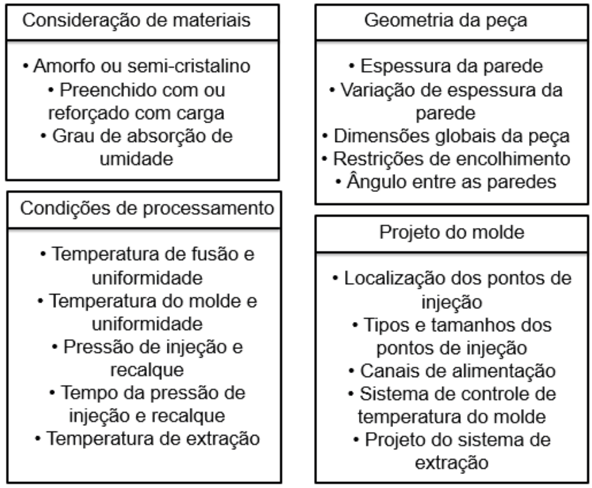



Figura 13 - Fatores que afetam a contração e empenamento de peças poliméricas. Adaptado de Malloy (2010).

As condições de processamento usualmente não são de conhecimento do projetista de peças poliméricas, entretanto um melhor conhecimento do fenômeno da contração ajuda a compreender como as várias fases de moldagem por injeção afetam a contração volumétrica da peça injetada (MALLOY, 2010).

Vários são os fatores que afetam a contração e o empenamento, porém neste trabalho serão detalhados os principais fatores necessários para o entendimento da parte experimental do mesmo.

## Tipo de polímero

Resinas amorfas e semicristalinas têm características de contrações únicas e, logo, características de empenamento diferentes, porém neste trabalho será dada mais ênfase nos polímeros semicristalinos para proporcionar maior entendimento das ações desenvolvidas.

Os polímeros semicristalinos tem uma taxa de contração que pode variar de 1,2 a 2,5 % (quando puros), eles orientam-se durante a moldagem por injeção ocasionando a contração diferencial, fenômeno mais evidente quando eles são preenchidos com cargas, tais como vibra de carbono e de vidro (LATI, 2008). Já para os polímeros amorfos, que não possuem arranjos moleculares orientados, apresentam menores valores de contração, variando de 0,4 a 1%, tendo assim maior estabilidade dimensional (LATI, 2008) Figura 14.

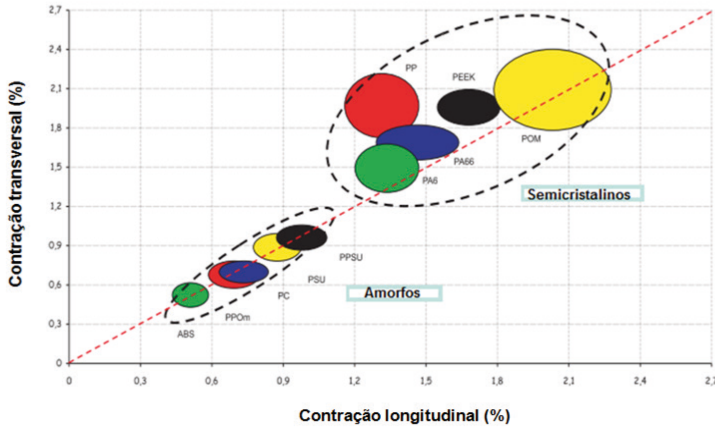



Figura 14 - Valores de contração longitudinal e transversal para os principais polímeros amorfos e semicristalinos.

Fonte: Adaptado de Lati (2008).

De acordo com Malloy (2010), a contração para um polímero não reforçado semicristalino como o PP pode ser cinco vezes maior do que um polímero amorfo não reforçado como o PMMA.

Tempo e temperatura também facilita a relaxação de tensões e uma ligeira cristalização adicional em materiais semicristalinos após serem extraídos da cavidade. Alguns materiais semicristalinos como poliacetal, PBT e PB, podem contrair até 0,5% após a moldagem. Quanto maior o tempo e a temperatura ambiente, maior a tendência de a peça sofrer contração após ser moldada (ANDREW, 2013).

Mecanicamente um polímero semicristalino exibe um aumento da rigidez devido à união dos cristais, reforçando a estrutura polimérica. Uma baixa taxa de cristalização ou baixo grau de cristalinidade tem como efeito reduzir o encolhimento e reduzindo assim o empenamento em polímeros semicristalinos (ANDREW, 2013).

## Espessura da peça

De acordo com Fischer (2003), o efeito da espessura da peça na contração é mais significativo em materiais semicristalinos do que em materiais amorfos. A Figura 15 mostra a variação da contração do polímero PBT não reforçado em função da espessura da peça, designada no molde como espessura de parede.

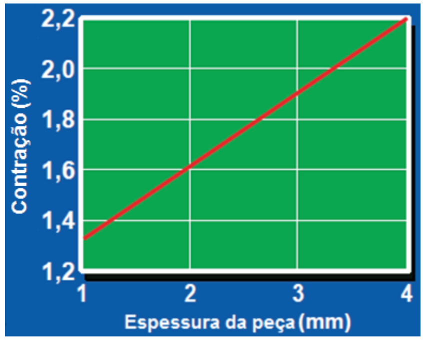



Figura 15 - Contração em função da espessura de uma peça para o PBT não reforçado.

Fonte: Adaptado de Wilkinson *et al* (2007).

Os maiores valores de contração podem ser esperados em polímeros semicristalinos quando as maiores espessuras de parede são utilizadas devido ao aumento do tempo de resfriamento e, consequentemente, tempo de cristalização, associado a paredes mais espessas (MALLOY, 2010).

## Variações da espessura na peça

Peças injetadas com espessura de parede mais grossa são mais difíceis de resfriarem, requerem recalque adicional e seu resfriamento é mais demorado. Quando uma peça possui ambas as seções espessa e fina, o ponto de injeção é indicado na parte mais espessa, porque permite que seja aplicado o recalque na seção mais espessa mesmo que a parte mais fina esteja solidificada (MALLOY, 2010). Por exemplo, quando uma peça moldada tal como a mostrada na Figura 16, é ejetada da cavidade a seção mais espessa e mais quente da peça irá continuar a arrefecer e encolher mais do que as seções mais finas. Este fato irá resultar em tensões internas na região onde há a variação de espessura da peça e estas poderão, a curto ou longo prazo, resultar em empenamento, redução do desempenho mecânico e químico em serviço (MALLOY, 2010).

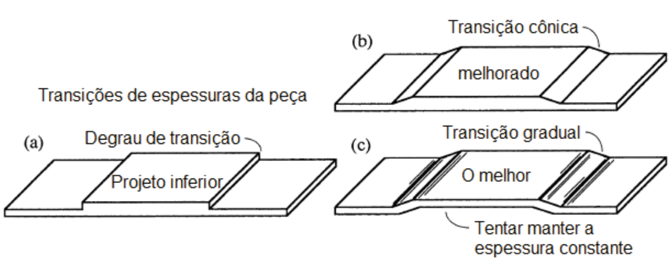



Figura 16 - Peças contendo variações de espessura de parede devem ser evitadas.

Fonte: Malloy (2010).

Quando variações de espessura de parede devem ser incorporadas ao projeto de uma peça, transições cônicas (tipicamente afunilada ao longo do comprimento igual a três vezes a espessura) podem ser utilizadas para a redução da concentração de tensão.

A contração de uma peça polimérica aumenta com o aumento da espessura da parede. Caso a peça apresente variações de espessura, haverá contração não uniforme na peça. Segundo Harada (2012), a contração diferencial devido a uma espessura de parece não uniforme é a maior causa de distorção na peça nos termoplásticos não reforçados. Além disso, segundo este mesmo autor, diferentes taxas de resfriamento e níveis de cristalização, geralmente aparecem no interior das peças que apresentam seções de parede com variação de espessura, causando o empenamento. A Figura 17 mostra uma peça empenada devido a um alto nível de cristalização nas áreas de resfriamento lento na seção mais espessa.

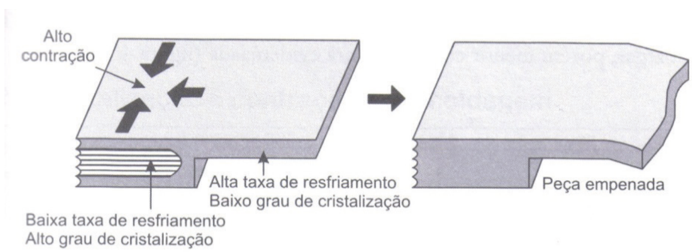



Figura 17 - Empenamento devido a variação de espessura de uma peça polimérica.

Fonte: Harada (2012).

Variação na espessura da peça é comumente encontrada no ponto de injeção de peças poliméricas injetadas, pelo fato de serem, usualmente, mais estreitos e menos espessos do que a peça. A posição do ponto de injeção determina o padrão de fluxo do material na cavidade afetando a orientação do fluxo na peça. Em materiais sem reforços fibrosos, a contração tende a ocorrer mais na direção do fluxo do que na perpendicular. Já para materiais com reforços fibrosos, a orientação do fluxo tem maior efeito, pois possuem de duas a três vezes mais contração no sentido perpendicular ao fluxo do que no sentido longitudinal (LANXESS, 2007).

## Presença de nervuras

As nervuras proporcionam um meio econômico para aumentar a rigidez e resistência de peças moldadas sem aumento global da espessura da parede (LANXESS, 2007). Caso as nervuras não forem bem projetadas, podem levar ao empenamento da peça.

A espessura das nervuras determina a taxa de arrefecimento e o grau de encolhimento da região na peça, que por sua vez afeta o grau de empenamento. Em aplicações onde as

nervuras são utilizadas para reforçar peças em forma de placa, as nervuras normalmente são mais finas do que a espessura nominal da peça por este motivo, a parede principal da peça irá arrefecer mais lentamente e levando um aumento da contração e potencial empenamento em sentido oposto das nervuras (MALLOY, 2010). O oposto ocorre nas nervuras, sendo mais finas tendem a solidificar-se antes e encolhem menos. Este fenômeno pode ser observado na Figura 18.

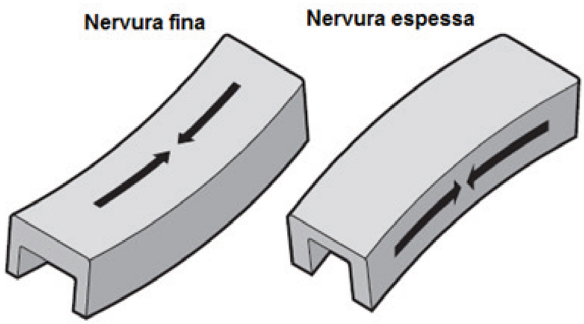



Figura 18 - Empenamento em peças com nervuras finas e espessas.

Fonte: Adaptado de Lanxess (2007).

### Efeito da temperatura do molde

A temperatura em que o polímero irá resfriar (temperatura da superfície do molde) tem influência nas propriedades das peças moldadas. Quanto mais próxima da temperatura de fusão for o resfriamento, mais baixo será o sub-resfriamento e maior o crescimento dos esferulitos e, também, a viscosidade do fundido será diminuída dando maior mobilidade das cadeias, o que resulta em maior cristalinidade (CRUZ, 2013).

O resfriamento de materiais semicristalinos deve ocorre em temperaturas do molde maiores do que a temperatura de transição vítrea. Abaixo dessa temperatura o material pode esfriar numa estrutura amorfa imprópria. Como resultado, o material terá uma baixa contração, porém com o tempo o material irá recuperar a estrutura cristalina original, criando problemas de empenamento (LATI, 2008). Este fenômeno é acentuado quando a peça irá trabalhar em temperaturas superiores a temperatura do molde durante a transformação. O contrário ocorre com materiais amorfos, o aquecimento do molde é feito para melhorar o fluxo do material na cavidade, sem ter efeitos reais na contração. A Figura 19 a contração em função da temperatura do molde para uma peça moldada em PBT.

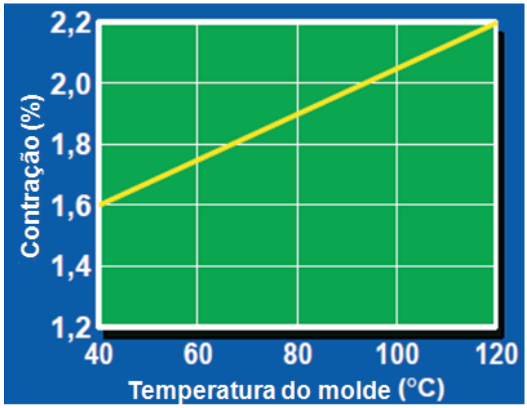



Figura 19 - Contração em função da temperatura do molde para o PBT.

Fonte: Adaptado de Wilkinson *et al* (2007).

Ainda deve-se considerar a contração na moldagem e na pós-moldagem. A Figura 20 mostra a influência da temperatura do molde na contração na moldagem e na pós-moldagem de peças injetadas em PA6.

Com a $T_W$ maior, a contração na moldagem é maior e pode ser controlada. Na $T_W$ menor (40°C) a contração na pós-moldagem é maior. Este caso deve ser evitado, pois há dificuldade de prever a contração resultante após a moldagem (ZÖLLNER, 1997).

A dificuldade de tentar minimizar o empenamento ou a contração é que as condições necessárias para minimizar o efeito destas são inversas. Por exemplo, um resfriamento mais alto, causa contração linear média mais baixa, mas aumenta a tendência da peça empenar, especialmente em peças que possuem grande razão entre superfície/espessura.

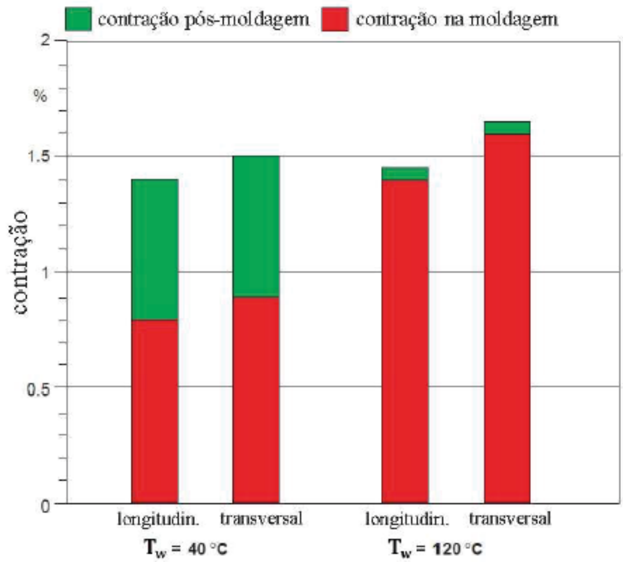



Figura 20 - Contração na moldagem e na pós-moldagem em função da temperatura do molde.

Fonte: Zöllner *apud* Pistorello (2012).

## Resfriamento não uniforme do molde

Devido à complexidade geométrica de peças e, consequentemente dos moldes, é difícil de conseguir um arrefecimento completamente uniforme de uma peça na prática. Um arrefecimento não uniforme provoca contrações térmicas diferenciais em toda a espessura da peça quando ela arrefece a partir da temperatura inicial de processamento até a temperatura ambiente. As superfícies quentes da peça continuam a contrair mais do que as superfícies mais frias após a extração da peça. Este encolhimento diferencial deixa a peça susceptível a se distorcer depois de ser extraída do molde (MALLOY, 2010).

Durante a refrigeração de uma peça polimérica, as áreas mais quentes de uma peça tendem a ficarem mais cristalinas do que as áreas mais frias, deste modo, a peça tende a contrair-se para o lado mais cristalino desta. Este feito é observado quando há uma diferença de temperatura nas cavidades do molde ou resfriamento assimétrico da peça. A Figura 21 mostra o efeito de (a) resfriamento não uniforme da peça e (b) resfriamento assimétrico através da espessura da peça.

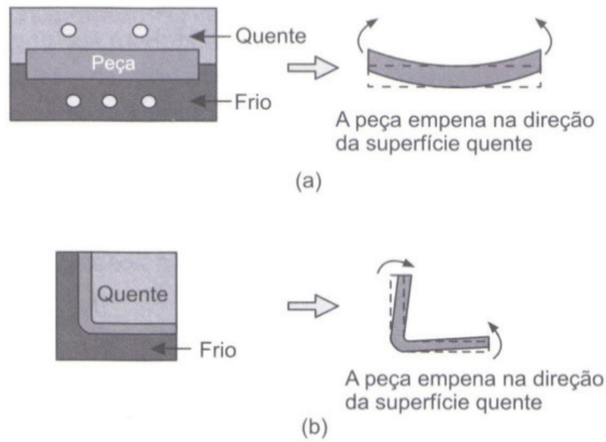



Figura 21 - Empenamento da peça devido a (a) resfriamento não uniforme na peça, e (b) resfriamento assimétrico através da espessura da peça.

Fonte: Harada (2012).

Quando a peça é suficientemente rígida para evitar distorções devido a um grande módulo de elasticidade ou características geométricas de reforço, ela irá manter a sua forma, mas ficará com tensões internas. Este fato é importante, porque tensões internas podem levar a redução da resistência ao impacto, e um possível empenamento quando a peça é exposta a elevadas temperaturas (onde o módulo é reduzido) em algum momento durante a montagem ou em serviço (MALLOY, 2010).

Alguns fatores como: temperatura de extração mais baixa e materiais com maiores módulo de elasticidade ajudam a diminuir o empenamento em casos de resfriamento não uniforme (MALLOY, 2010).

## ESTUDOS RELACIONADOS AO EMPENAMENTO DE PEÇAS POLIMÉRICAS

Vários trabalhos têm sido realizados visando compreender a influência de parâmetros de moldagem no empenamento de peças poliméricas.

Bociaga *et al* (2010) estudou a influência da diferença de temperatura entre as placas do molde no empenamento de peças injetadas em polipropileno em um molde metálico. Neste estudo, foram injetadas peças com dimensões de 150,0x25,0x4,0 mm, utilizando temperaturas na parte fixa do molde de 20°C e na móvel de 90°C. Também foram injetadas peças em iguais temperaturas do molde (50°C) a fim de comparar com as anteriores. O empenamento foi medido com o auxílio de um apalpador eletrônico de contato de acordo com a Figura 22.

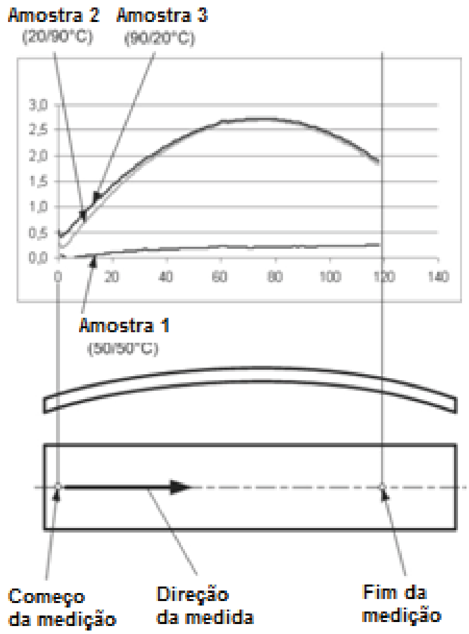



Figura 22 - Empenamento medido (mm) ao longo do comprimento da peça.

Fonte: Bociaga *et al* (2010).

Leães (2008) verificou a influência da variação gradual da diferença de temperatura entre as placas de um molde metálico no empenamento de peças moldadas em poliestireno e polipropileno. Neste trabalho, o empenamento foi medido com o auxílio de um traçador de altura de duas maneiras: fixando o corpo de prova numa extremidade e medido a altura em relação a uma mesa de desempeno (Figura 23) e medindo a flecha do corpo de prova posicionado na mesa de desempeno (Figura 24).

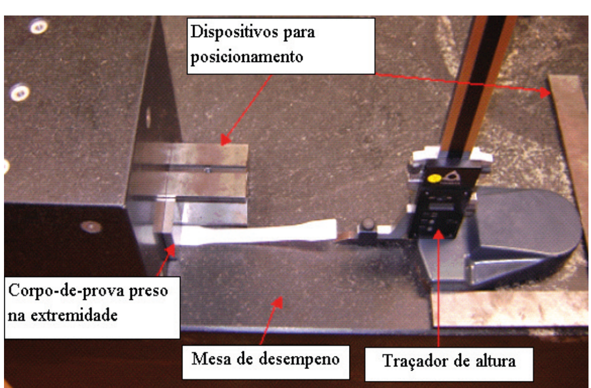



Figura 23 - Procedimento de medição de empenamento.

Fonte: Leães (2008).



Figura 24 - Medição do empenamento através da flecha do corpo de prova.

Fonte: Bom e Leães (2007).

Em um de seus experimentos os valores medidos no traçador foram comparados com os medidos em *software* CAE *Moldflow*, onde obteve-se o seguinte gráfico, Figura 25.

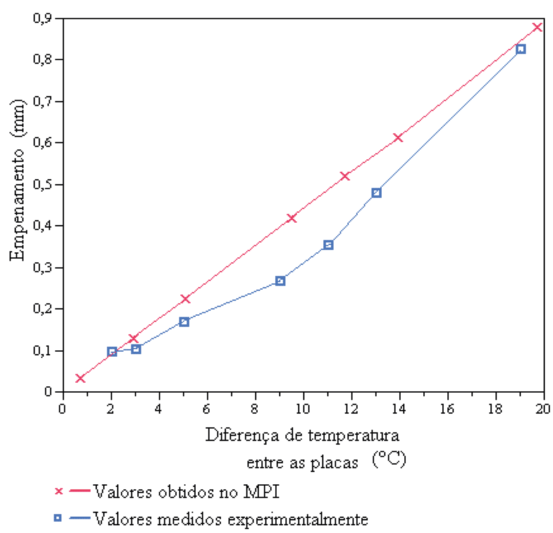



Figura 25 - Empenamento em função da diferença de temperatura para valores obtidos no CAE (MPI) e experimentalmente.

Fonte: Bom e Leães (2007).

Neste experimento foi observado que o maior valor do empenamento foi na diferença de temperatura das placas de 19°C, com valores de 0,82 mm e 0,946 mm, medidos experimentalmente e no CAE, respectivamente. Também foi observado que os valores de

empenamento tiveram comportamento linear no aplicativo, diferentemente do encontrado experimentalmente.

Alves (2008), em um de seus experimentos, verificou a influência da pressão de recalque (hp) e da temperatura do molde no empenamento de peças injetadas em polipropileno puro (Figura 26) e reforçadas com fibra de vidro (20%) (Figura 27) em um molde metálico. A medida do empenamento foi feita em ângulo de deformação ao longo da peça, pois a peça apresentava geometria curva (empenamento transversal ao fluxo).

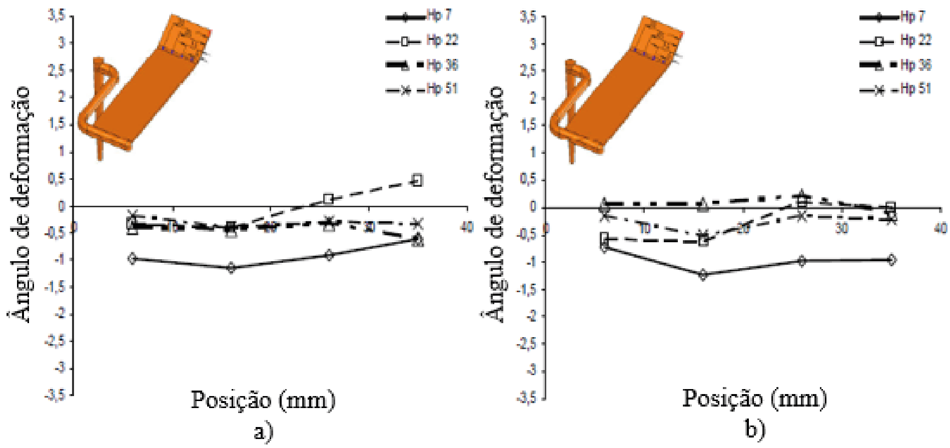



Figura 26 - Efeito da pressão de recalque e temperatura do molde no empenamento (ângulo de deformação) em diferentes posições da peça para (a) molde a 25°C e (b) 40°C.

Fonte: Adaptado de Alves (2008).

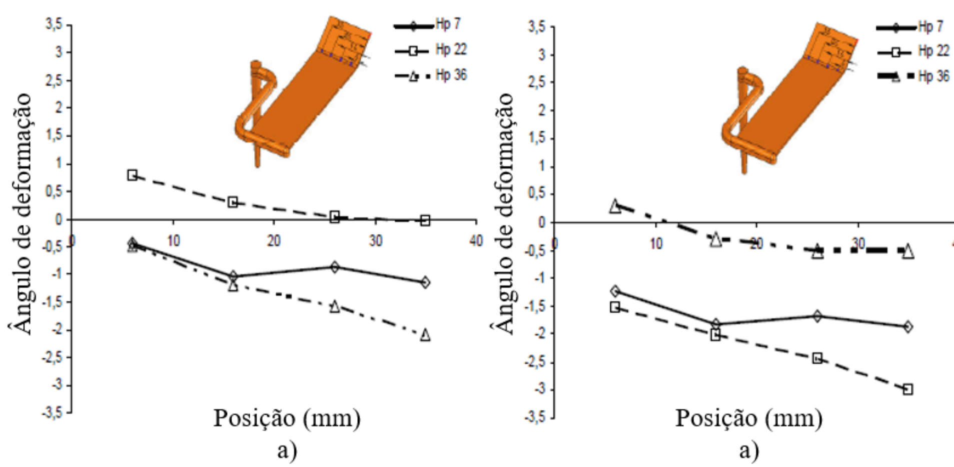



Figura 27 - Efeito da pressão de recalque e temperatura do molde no empenamento para peças com 20% de vibra de vidro. (a) molde a 25°C e (b) 40°C

Fonte: Adaptado de Alves (2008).

Neste trabalho, é possível observar que o aumento da temperatura do molde, aumentou o empenamento tanto em peças reforçadas como nas não reforçadas. A adição de fibra de vidro aumentou o empenamento longitudinal devido à orientação das fibras na moldagem por injeção. Para materiais não reforçados, o aumento da pressão de recalque, diminuiu o empenamento.

Larpsuriyakul & Fritz (2011) estudaram a influência da diferença de temperatura entre as cavidades de um molde metálico no empenamento de peças injetadas com adesivos no molde (*In-mold labeling*) em polipropileno. Três peças (100,0x50,0x2,0 mm) foram injetadas: sem a presença do filme, com um filme de 50 $\mu$m e outra com filme de 75 $\mu$m de espessura, além da variação de temperatura entre as placas do molde $T_w$ (0, 25, 35°C) como é mostrado na Figura 28.

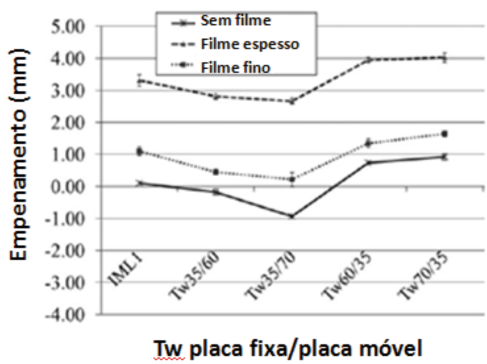



Figura 28 - Empenamento medido em peças sem filme, com filme de 50 e 75 $\mu$m.

Fonte: Larpsuriyakul & Fritz (2011).

Como o filme possui condutividade térmica menor do que molde metálico, as peças injetadas com o filme de 75 $\mu$m apresentaram empenamento maior do que as com filme de 50 $\mu$m e as sem filme. Além de o empenamento ser maior onde a variação da temperatura das placas foi maior, ou seja, 35°C.

Kovács (2006) mediu empenamento de peças moldadas por injeção em polipropileno através de *software Moldflow™* em molde metálico e em resina epóxi com diferença de temperatura entre as placas. Foi observado que o empenamento das peças moldadas em epóxi foi duas vezes maior do que as moldadas em molde metálico. Em uma das suas conclusões o fato da condutividade térmica da resina ser inferior a do aço, obteve-se maiores temperaturas no molde em epóxi, taxa de contração maior após a desmoldagem e consequentemente maior empenamento.

Silva (2009) comparou o empenamento de peças injetadas em molde híbrido (resina epóxi com 20% de carga de alumínio) com molde de aço e simulação CAE para um polímero

amorfo (PS) e um semicristalino (PP). Foram observados empenamentos maiores quando utilizado os moldes híbridos devido à diferença de condutividade térmica das paredes do molde. Também foi concluído que a simulação CAE teve melhores resultados quando foi simulado em molde híbrido e utilizando polímero amorfo.

Os resultados dos trabalhos avaliados evidenciam a influência da temperatura do molde no empenamento, especialmente quando se tratam de moldes metálicos injetados predominantemente com material polipropileno. Embora alguns pesquisadores já tenham investigado o empenamento em moldes de resina epóxi, não foram encontrados trabalhos referentes ao uso de biopolímeros neste tipo de molde, evidenciando a existência de uma oportunidade de busca de conhecimento nesta área.

# MATERIAIS E MÉTODOS

## SEQUÊNCIA EXPERIMENTAL

Para avaliar e mensurar o empenamento e contração das peças injetadas em PLA e PA66 em molde VRE e metálico foi estabelecida uma sequência experimental conforme Figura 29. A partir dos materiais semi-cristalinos, foram feitas as simulações para avaliar a influência da espessura da peça e temperatura do molde no empenamento. Nesta simulação foram escolhidos dois materiais semi-cristalinos (PLA e PA66) que, posteriormente foram utilizados para a parte experimental, onde foi medido o empenamento e a contração (transversal e longitudinal).

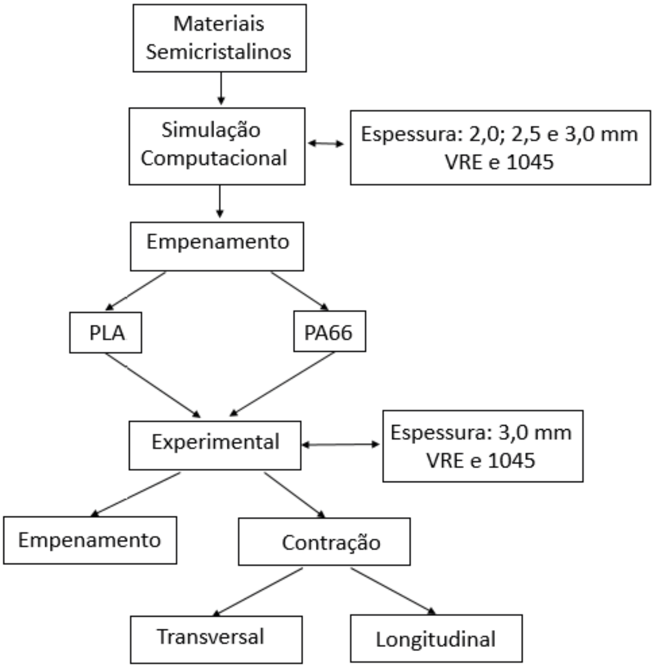



Figura 29 – Sequência experimental.

Através da sequência experimental foi definido o projeto e todas as condições da moldagem por injeção. Os projetos da peça e do molde foram feitos em software CAD Solidworks 2010™ e posteriormente simulado em software CAE Moldflow™ 2012. O empenamento foi medido com o auxílio de um traçador de altura com resolução de 0,02 mm da marca Mitutoyo e a contração medida no molde e na peça com um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm da marca Mitutoyo.

## GEOMETRIA DA PEÇA PARA AVALIAÇÃO

Para a definição da geometria da peça, foram levados em conta os seguintes fatores:

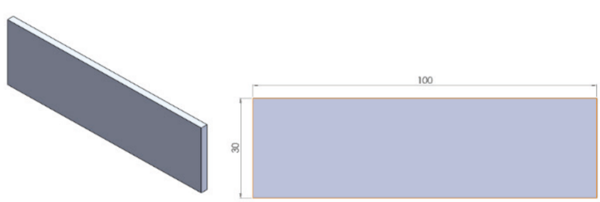
- Geometria em que o empenamento fosse facilmente observado;
- Possibilidade de medição do empenamento e da contração experimentalmente após a fabricação;
- Dimensões da peça limitadas às dimensões do porta-moldes existentes no laboratório CIMJECT.

A geometria da peça escolhida é mostrada na Figura 30. Trata-se de uma peça plana retangular similar a geometria utilizada nos trabalhos de Bociaga *et al* (2010) e Fritz e Larpsuriyakul (2011) onde estes autores investigaram o empenamento em peças poliméricas injetadas em moldes metálicos.

Para verificar a influência da espessura da peça no empenamento, foram escolhidas as espessuras de 2,0; 2,5 e 3,0 mm usualmente empregadas em peças poliméricas injetadas, para serem primeiramente analisadas no *software* CAE. Para avaliar o empenamento e a contração com base em valores obtidos a partir de moldagem realizadas em uma máquina injetora, os experimentos foram conduzidos com a espessura de 3 mm.

As dimensões das peças ficaram limitadas devido às dimensões do inserto (130,0 x 70,0 x 75,0 mm) de porta-moldes disponível.

A Figura 30 mostra a peça em perspectiva e em desenho esquemático.




(a) (b)

Figura 30 - Peça em perspectiva (a), Desenho esquemático (b)

## DEFINIÇAO DOS CANAIS DE ALIMENTAÇÃO E PONTOS DE INJEÇÃO

Os canais de alimentação foram dimensionados de acordo com a literatura de moldes metálicos apresentadas em Brito *et al* (2004) e Bryce (1998). O perfil dos canais de alimentação foi do tipo trapezoidal, escolhido devido a sua facilidade de fabricação e por evitar eventuais desalinhamentos devido às partes fixa e móveis do molde.

A escolha e dimensionamento do ponto de injeção seguiram recomendações fornecidas pelos mesmos autores já mencionados e também com base no estudo realizado por Perreira (2007), o que resultou em um ponto de injeção do tipo lâmina, indicado para injetar moldados do tipo bloco sólido e também selecionado para evitar ou reduzir a

possibilidade do efeito de esguichamento do fundido ao adentrar na cavidade do molde. A Figura 31 mostra a configuração final da peça com os canais de alimentação e com o ponto de injeção, modelados no software CAD.

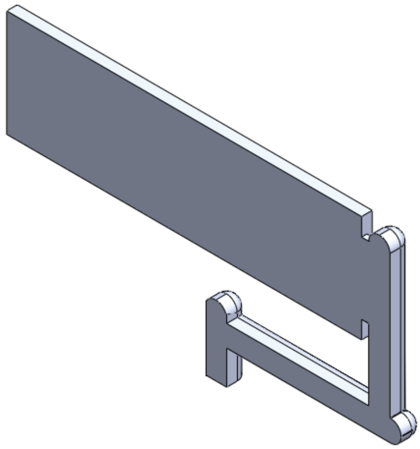


Figura 31 - Representação em CAD da peça.

## DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O dimensionamento do sistema de refrigeração foi projetado seguindo o método e as recomendações de Britto *et al* (2003) e de Pistorello (2012). O *layout* do sistema de refrigeração escolhido foi o de canais em série, devido à facilidade de fabricação (furação).

O método recomendado tem como base a realização de cálculos visando o balanço térmico do molde durante o processo de moldagem por injeção para determinar valores teóricos preliminares sugeridos para a vazão, diâmetro, posicionamento e comprimento dos canais de refrigeração, resultando nos valores mostrados na Tabela 1. Uma descrição detalhada das equações utilizadas no método é apresentada em Pistorello (2012).

| ***Parâmetros*** | ***VRE*** | ***Aço*** |
|---|---|---|
| Vazão (l/min) | 2,1 | 2,9 |
| Diâmetro dos canais (mm) | 8 | 8 |
| Distância até a cavidade (mm) | 20 | 20 |
| Comprimento dos canais* (mm) | 6320 | 544 |

Tabela 1- Dimensionamento preliminar do sistema de refrigeração (Resina e Aço).

*Tanto para o macho quanto para a fêmea.

Para se ajustar às limitações de dimensionamento do inserto do porta-moldes o comprimento dos canais foi reduzido para 306 mm, a distância até a cavidade foi modificada para 30 mm e para a vazão foi adotado o valor de 3,8 l/min, vazão sugerida

como recomendação mínima obtida da prática na indústria de moldes (BRITO *et al*, 2004). A configuração final dos canais resultou similar a já empregada nos trabalhos de Peixoto (2009) e Pistorello (2012).

Assim, para ambos os materiais do molde (Resina e Aço), o dimensionamento final do sistema de refrigeração adotado empregou os valores mostrados na Tabela 2.

| ***Parâmetros*** | ***Valor*** |
|---|---|
| Vazão (l/min) | 3,8 |
| Diâmetro dos canais (mm) | 8 |
| Distância até a cavidade (mm) | 30 |
| Comprimento dos canais* (mm) | 306 |

Tabela 2- Dimensionamento final do sistema de refrigeração para ambos os materiais do molde (Resina e Aço).

*Tanto para o macho quanto para a fêmea.

A Figura 32 mostra a peça com o sistema de refrigeração posicionado.

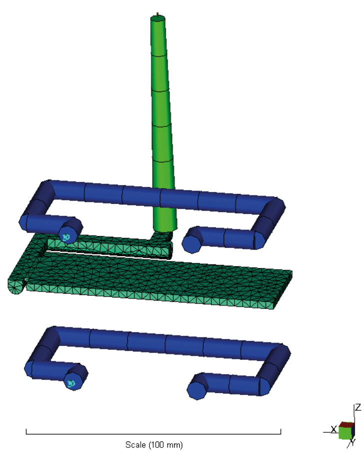



Figura 32 - *Layout* do sistema de refrigeração (em azul).

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

## Parâmetros utilizados na simulação

Os parâmetros de entrada no *Software* CAE foram os seguintes:

- Importação das peças: Formato STL;
- Seleção do processo: Moldagem por injeção;
- Tipo de análises: *Cool + Fill + Pack +Warp*;

- Tipo de malha: Dual Domain;
- Máquina de moldagem por injeção: Arburg Allrounder 320 S
- Fluido refrigerante do molde: Água pura;

O formato de importação das peças (STL) foi escolhido devido à baixa complexidade das geometrias das peças, e por apresentar maior valor de *Mach Percentage* (91%) em relação ao formato no padrão IGES. Este valor representa uma medida de como os elementos em uma superfície correspondem com os elementos da superfície oposta e também proporciona um comportamento confiável do fluxo do polímero na cavidade, afetando a previsão do empenamento (*warp*) (PISTORELLO, 2012).

A escolha do tipo da malha *Dual Domain* deveu-se ao fato das peças serem de geometrias simples, ser mais indicado para estudo de empenamento e contração e por apresentar tempos de processamento menores nas simulações.

## Materiais utilizados na simulação

Os materiais poliméricos semicristalinos selecionados para estudo foram:

- Biopolímero Poli(ácido lático) PLA *Ingeo*™ 3251D, da fabricante Nature Works (Tabela 3); por ser um biopolímero que vem sendo utilizado pela indústria de produtos injetados de plástico, produzido em escala industrial e de baixo custo;
- Poliamida 66 (PA66) Technyl® *grade* A 216 Natural, da Rhodia Engineering Plastics (Tabela 4); por ser um material de elevada contração durante a solidificação e que usualmente está mais sujeito a efeitos de empenamento.

| ***Propriedades*** | ***Unidade*** | ***Valor*** |
|---|---|---|
| Contração Nominal Paralela ao fluxo | % | 0,221 |
| Contração Nominal Perpendicular | % | 0,193 |
| Temperatura de Fusão Cristalina | °C | 190 |
| Temperatura de Transição Vítrea* | °C | 55-60 |
| Condutividade Térmica a 210°C | W/(m.°C) | 0,170 |
| Calor Específico a 210°C | J/(kg .°C) | 2944 |
| Módulo de Elasticidade | MPa | 3500 |
| Densidade a 210°C | kg/m$^3$ | 1050,1 |
| ***Parâmetros de Processamento*** | | |
| Temperatura do molde (min.) | °C | 4 |
| Temperatura do molde (Max.) | °C | 40 |
| Temperatura de injeção indicada | °C | 190 |
| Temperatura de extração | °C | 95 |
| Tensão de cisalhamento máxima admissível | MPa | 0.5 |
| Taxa de cisalhamento máxima admissível | 1/s | 50000 |

Tabela 3 - Propriedades do Biopolímero PLA *Ingeo*™ 3251D.

Fonte: Moldflow (2012). * Datasheet Natureworks (2014).

| *Propriedades* | *Unidade* | *Valor* |
|---|---|---|
| Contração Nominal Paralela ao fluxo | % | 1,732 |
| Contração Nominal Perpendicular ao fluxo | % | 2,302 |
| Temperatura de Fusão Cristalina | °C | 285 |
| Temperatura de Transição Vítrea | °C | 215 |
| Condutividade Térmica a 285°C | W/(m . °C) | 0,2 |
| Calor Específico a 285°C | J/(kg . °C) | 2640 |
| Módulo de Elasticidade | MPa | 3000 |
| Densidade a 285°C | kg/m$^3$ | 974,66 |
| ***Parâmetros de Processamento*** | | |
| Temperatura do molde (min.) | °C | 40 |
| Temperatura do molde (Max.) | °C | 80 |
| Temperatura de injeção indicada | °C | 285 |
| Temperatura de extração | °C | 210 |
| Tensão de cisalhamento máxima admissível | MPa | 0.5 |
| Taxa de cisalhamento máxima admissível | 1/s | 60000 |

Tabela 4 - Propriedades da PA66 Technyl® *grade* A 216 Natural.

Fonte: Moldflow (2012).

O inserto (molde-protótipo) foi fabricado em Resina Epóxi RenCast™ 436 CW (com 20% de carga de alumínio) do fabricante Huntsman® material escolhido devido ser frequentemente utilizado em moldes de fabricação rápida como é mostrado na Tabela 5.

| *Propriedades* | *Unidade* | *Valor* |
|---|---|---|
| Condutividade Térmica | W/m. °C | 0,78 |
| Calor Específico | J/(kg . °C) | 2,302 |
| Massa Específica | kg/m$^3$ | 285 |
| Dureza | Shore D | 85-90 |
| Resistência à Tração | kg/mm$^2$ | 4,5 |
| Resistência à Flexão | kg/mm$^2$ | 7,5 |
| Módulo de Elasticidade | GPa | 0.65-0.75 |
| Coeficiente de Transferência de Calor | W/m$^2$. °C | 1.983 |

Tabela 5 - Propriedades da Resina RenCast™ 436 CW após a cura.

Fonte: Hunstmann (2011).

Já o molde metálico foi simulado com o material AISI 1045 conforme Tabela 6.

| *Propriedades* | *Unidade* | *Valor* |
|---|---|---|
| Condutividade Térmica | W/m. °C | 49,8 |
| Calor Específico | J/(kg . °C) | 486 |
| Massa Específica | kg/m$^3$ | 7800 |
| Dureza | HRC | 50-55 |
| Resistência à Tração | kg/mm$^2$ | 950-1100 |
| Módulo de Elasticidade | GPa | 205 |
| Coeficiente de Transferência de Calor | W/m$^2$. °C | 24598 |

Tabela 6 - Propriedades do molde metálico AISI 1045.

Fonte: Cavalheiro (2007); Matweb (2014).

## Parâmetros de processamento para a simulação da injeção

Os parâmetros de entrada tais como: pressão de injeção, pressão de recalque, ponto de comutação, velocidade de injeção e velocidade do parafuso foram colocados no modo automático do *software*, sendo ajustados parâmetros como: temperatura de injeção, temperatura da superfície do molde e tempo de resfriamento.

Para a simulação via CAE foram utilizadas as espessuras de 2,0; 2,5 e 3,0mm e que resultaram nas propriedades das malhas das três peças, mostradas na Tabela 7.

| ***Espessura da peça*** | ***Comprimento de aresta global*** | ***Número de Elementos*** | ***Razão de Aspecto**** |
|---|---|---|---|
| 2,0 mm | 3,54 | 1902 | 2,81/16,3 |
| 2,5 mm | 3,54 | 1926 | 2,4/13,7 |
| 3,0 mm | 3,54 | 1989 | 2,78/ 17,4 |

Tabela 7 - Propriedades das malhas para as três peças.

*Média e máxima.

As temperaturas do molde foram divididas em três níveis para o cálculo do empenamento e da contração, visando observar a influência da temperatura do molde no valor do empenamento e contração das peças poliméricas, conforme Tabela 8.

| ***Polímero*** | ***Faixa de temperaturas do molde (°C)*** |
|---|---|
| PLA *Ingeo*™ 3251D | 25, 38, 51 |
| PA66 Technyl® *grade* A 216 | 40, 55, 70 |

Tabela 8 - Temperaturas do molde para as análises

Para a medição do empenamento na simulação, foi selecionado o resultado *warp* (empenamento) com a opção *deflection, all efects*, está opção usada para simular os efeitos combinados do empenamento em todas as direções da peça (XYZ), o que torna o resultado da simulação mais idêntico ao resultado medido na prática. Em seguida foi selecionado um plano de desempeno horizontal paralelo ao eixo XY longitudinalmente à peça e medido na extremidade oposta ao ponto de injeção no centro da peça, conforme Figura 33.

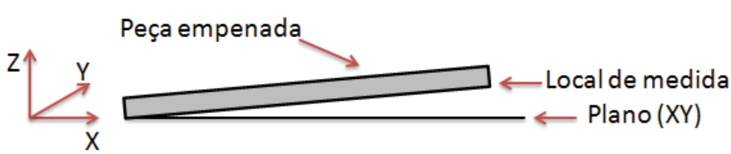



Figura 33 - Desenho esquemático do procedimento de medição do empenamento simulado.

## FABRICAÇÃO DO INSERTO POR VRE

O inserto não metálico foi fabricado através do processo de vazamento de resina epóxi. Primeiramente a resina foi misturada com o catalisador na relação de 6% em massa, seguindo as recomendações do fabricante.

A mistura da resina com o catalisador foi feita sob vácuo em um recipiente desenvolvido pelo CIMJECT, a uma rotação que não ultrapassasse 60 rpm para evitar a formação de bolhas por 6 minutos.

Após ser misturada, a resina foi diretamente vazada na cavidade da camisa do molde com as seguintes dimensões: 130x75x70 mm. Depois de 72 horas, o inserto em resina foi desmoldado da camisa com o auxílio de uma prensa hidráulica e sua pós-cura foi realizada em um forno elétrico da marca Fischer, seguindo o ciclo da Tabela 9.

| *Etapa* | *Tempo (h)* | *Temperatura (°C)* |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 70 |
| 2 | 2 | 90 |
| 3 | 2 | 120 |
| 4 | 10 | 150 |

Tabela 9 - Temperaturas do molde para a análise do empenamento.

A cavidade do molde e os canais de alimentação foram usinados em uma máquina fresadora CNC modelo Roland MDX-540, enquanto a furação dos canais de refrigeração e extratores foram feitos em uma fresadora manual. A Figura 34 mostra as duas metades do inserto VRE finalizado.

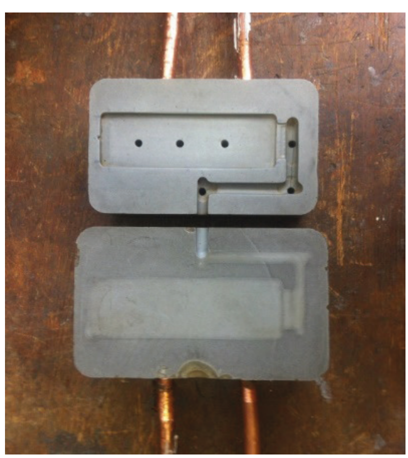


Figura 34 - Inserto fabricado por VRE.

## FABRICAÇÃO DO INSERTO METÁLICO

Para a moldagem junto à máquina injetora, foi usinado o inserto metálico, em aço AISI 1045, mostrado na Figura 35. A geometria da cavidade, canais de alimentação, refrigeração e extratores foram idênticos ao inserto VRE. O bloco foi usinado em uma máquina CNC e posteriormente nitretado com uma camada de 0,1 mm.

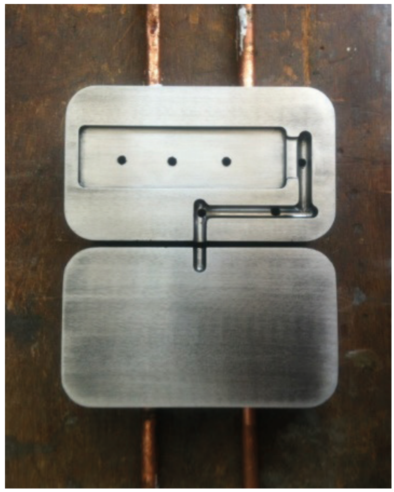


Figura 35 - Inserto metálico.

## MOLDAGEM POR INJEÇÃO

A espessura da peça selecionada para a moldagem por injeção foi a de 3mm, pois apresentou maiores valores para o empenamento e por ser uma espessura comumente utilizada na indústria de processamento de polímeros.

A moldagem por injeção foi realizada em uma máquina injetora modelo ARBURG ALLROUNDER 320S 50T, com parafuso de 35 mm de diâmetro. Os parâmetros de entrada utilizados na máquina foram baseados nas informações técnicas do fabricante (NATUREWORKS, 2012), nos dados do *software Autodesk Moldflw Insight*™ 2012 e na literatura especializada.

Para a regulagem da temperatura do molde foi utilizado um termorregulador da MICROQUÍMICA modelo MBQTC-9920, com vazão de 4 l/min de água.

A medição da temperatura do inserto foi feita com o auxílio de um termômetro infravermelho modelo TD-965 da marca ICEL. Foram feitas duas medições de temperatura no inserto: cinco segundos antes de começar um novo ciclo e instantaneamente após o molde ser aberto, medido no centro e nas extremidades da cavidade.

Para cada temperatura da superfície do inserto, foram injetadas quatro amostras para cada material, PLA e PA66, depois de entrar em regime.

## Moldagem do PLA

Antes de ser injetado, o polímero PLA foi desumidificado seguindo recomendações do fabricante por aproximadamente 10 horas a 60°C em uma estufa convencional.

Os parâmetros utilizados na injeção do PLA foram ajustados experimentalmente e são apresentados na Tabela 10.

| *Parâmetro* | *Unidade* | *Valor* |
|---|---|---|
| Pressão de injeção | bar | 850 |
| Pressão de recalque | bar | 600 |
| Velocidade de injeção | mm/s | 60 |
| Temperatura de injeção | °C | 200 |

Tabela 10 - Parâmetros utilizados na injeção do PLA para o inserto VRE e metálico.

Para as diferentes temperaturas do molde, foram variados os tempos de ciclo e temperatura do fluido refrigerante, de acordo com a Tabela 11 para o inserto VRE e Tabela 12 para o inserto metálico.

| *Parâmetro* | $T_w$= 25°C | $T_w$=38°C | $T_w$=51°C | *Unidade* |
|---|---|---|---|---|
| Tempo de ciclo | 150 | 200 | 300 | s |
| Temperatura do fluido | 15 | 28 | 41 | °C |

Tabela 11 - Parâmetros obtidos na moldagem do PLA para as diferentes temperaturas do molde no inserto VRE.

| *Parâmetro* | $T_w$= 25°C | $T_w$=38°C | $T_w$=51°C | *Unidade* |
|---|---|---|---|---|
| Tempo de ciclo | 89 | 92 | 105 | s |
| Temperatura do fluido | 15 | 42 | 58 | °C |

Tabela 12 - Parâmetros obtidos na moldagem do PLA para as diferentes temperaturas do molde no inserto metálico.

## Moldagem da PA66

A PA66 foi desumidificada por aproximadamente 24 horas a uma temperatura de 70°C, antes de ser injetada.

Na moldagem da PA66, foi utilizado o mesmo molde usado para a moldagem do PLA, seguindo os parâmetros de processamento listados na Tabela 13.

| *Parâmetro* | *Unidade* | *Valor* |
|---|---|---|
| Pressão de injeção | bar | 650 |
| Pressão de recalque | bar | 380 |
| Velocidade de injeção | mm/s | 45 |
| Temperatura de injeção | °C | 280 |

Tabela 13 - Parâmetros utilizados na moldagem da PA66 para o inserto VRE e metálico.

Os parâmetros ajustados para as diferentes temperaturas do molde são apresentados na Tabela 14 para inserto o VRE e Tabela 15 para inserto metálico.

| ***Parâmetro*** | ***$T_w$ =40°C*** | ***$T_w$=55°C*** | ***$T_w$=70°C*** | ***Unidade*** |
|---|---|---|---|---|
| Tempo de ciclo | 130 | 120 | 140 | s |
| Temperatura do fluido | 30 | 45 | 60 | °C |

Tabela 14 - Parâmetros obtidos na moldagem da PA66 para as diferentes temperaturas do molde em inserto VRE.

| ***Parâmetro*** | ***$T_w$ =40°C*** | ***$T_w$=55°C*** | ***$T_w$=70°C*** | ***Unidade*** |
|---|---|---|---|---|
| Tempo de ciclo | 90 | 100 | 110 | s |
| Temperatura do fluido | 35 | 50 | 65 | °C |

Tabela 15 - Parâmetros obtidos na moldagem da PA66 para as diferentes temperaturas do molde em inserto metálico.

## MEDIÇÃO DO EMPENAMENTO E DA CONTRAÇÃO

As peças moldadas foram armazenadas em local seco a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) por 3 dias para a realização das medições. O empenamento foi medido com um traçador de altura com resolução de 0,02 mm. Cada peça foi medida 5 vezes para a obtenção da média e do desvio padrão em todas as medições. O dispositivo de medição e fixação da peça para o empenamento é mostrado na Figura 36.




Figura 36 - Dispositivo de fixação e medição do empenamento.

Todas as peças foram fixadas a uma distância de 10 mm do ponto de injeção e a leitura foi feita na extremidade oposta ao ponto de injeção no centro da peça sem tocar na peça a fim de evitar possíveis distorções.

Já para a medição da contração foi utilizado um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. Foram feitas medidas de contração longitudinal ao fluxo e transversal ao fluxo.

Para a medição da contração longitudinal foram feitas medidas em três locais diferentes na peça e no inserto: (PI) perto do ponto de injeção, (MF) na metade do fluxo e (FF) no final do fluxo, conforme indicado na Figura 37.

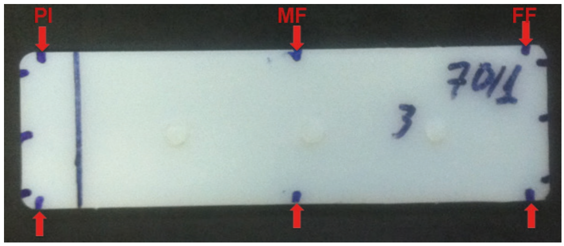



Figura 37 - Locais de medição da contração longitudinal na peça.

Também foram feitas três medidas para a contração transversal no molde e na peça de acordo com a Figura 38.

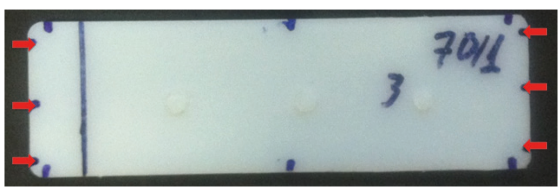



Figura 38 - Locais de medição da contração transversal.

Para o cálculo da contração longitudinal e transversal foram empregadas as equações da norma ASTM D 955-00, respectivamente.

$$S_1 = (L_m - L_s) \times 100/L_m \qquad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$S_1$ – Contração paralela ou longitudinal ao fluxo, %;

$L_m$ – Dimensão do molde paralelo ao fluxo;

$L_s$ – Dimensão da peça paralela ao fluxo.

$$S_w = (W_m - W_s) \times 100/W_m \qquad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$S_w$ – Contração perpendicular ou transversal ao fluxo, %;

$W_m$ – Dimensão da cavidade perpendicular ao fluxo;

Ws – Espessura da peça perpendicular ao fluxo.

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

## AVALIAÇÃO DO EMPENAMENTO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para facilitar a análise e discussão dos resultados de empenamento fornecidos pelo software CAE, estes são apresentados na forma de gráficos e tabelas. Para uma visualização dos resultados de empenamento conforme estes são apresentados pelo software de simulação, os resultados para as peças simuladas com espessura de 3 mm estão mostrados no Apêndice A.

Analisando os gráficos referentes à medição do empenamento via *software* CAE para peças simuladas em PLA em molde VRE e AISI 1045, Figura 39 e Figura 40, nas diferentes espessuras de parede, em ambos os moldes verifica-se que houve uma tendência de diminuição do empenamento com o aumento da temperatura do molde. A diferença entre os valores mínimos e máximos de empenamento não passaram de 0,2 mm chegando, em alguns casos, a apenas centésimos de milímetros, diferenças consideradas não significativas para peças moldadas por injeção.

Igualmente é possível verificar que, para uma mesma temperatura do molde, o aumento da espessura da peça não resultou em um aumento significativo do empenamento, tanto para o molde VRE quanto o metálico.

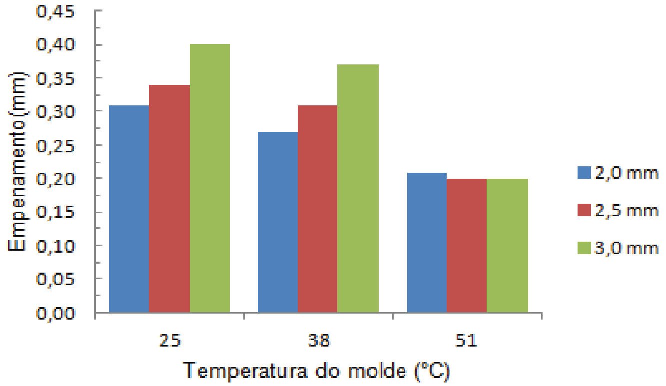



Figura 39 - Empenamento simulado em função da temperatura do molde de peças em PLA em molde VRE.

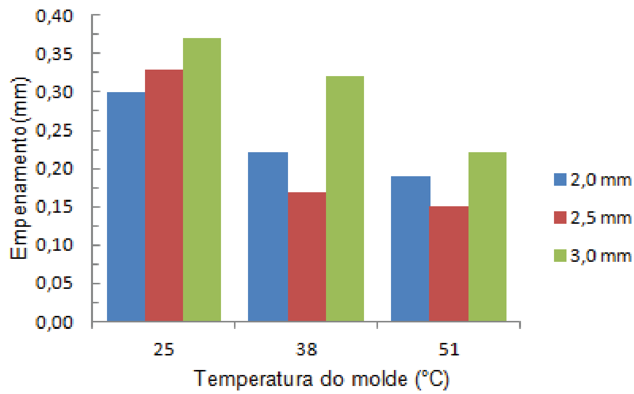



Figura 40 - Empenamento simulado em função da temperatura do molde de peças em PLA em molde metálico.

Na simulação em PLA em molde metálico, as peças simuladas com maior espessura tiveram um empenamento ligeiramente maior, uma vez que peças de paredes mais grossas tendem a resfriar mais lentamente e consequentemente contrair e empenar mais (LANXESS, 2007).

Estas diferenças não significativas encontradas na simulação do empenamento para o PLA podem ser atribuídas a lenta taxa de cristalização e baixa cristalinidade deste material, como foi evidenciado no trabalho de Pfeifer (2013) em que foram encontrados graus de cristalinidade de 17,84% para molde metálico e 18,88% para VRE.

Para as peças simuladas em PA66, Figura 41 e Figura 42, verificou-se um aumento mínimo no empenamento à medida que se aumenta a temperatura do molde tanto para o molde VRE como o metálico.

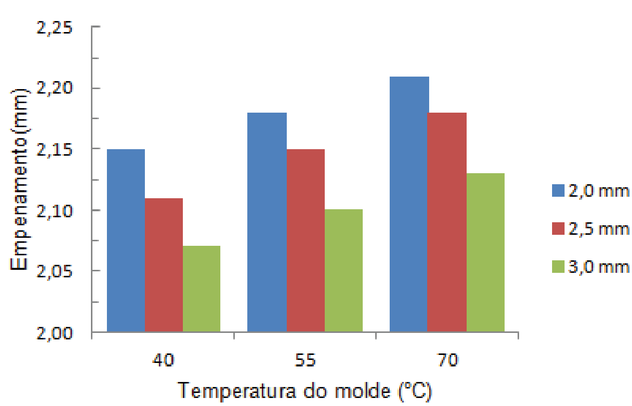



Figura 41 - Empenamento simulado em função da temperatura do molde de peças em PA66 em molde VRE.

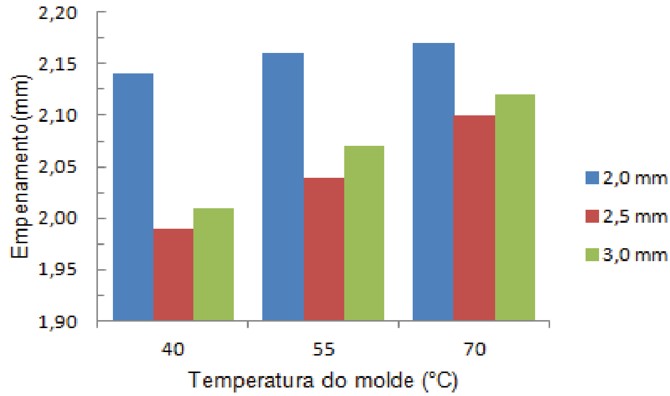



Figura 42 - Empenamento simulado em função da temperatura do molde de peças em PA66 em molde metálico.

Comparando os diferentes materiais simulados, tanto em molde VRE como metálico, observou-se para ambos os materiais do molde que as peças simuladas em PA66 apresentaram em todas as temperaturas do molde, maiores valores de empenamento do que o PLA. Este comportamento já era esperado devido a PA66 além de tipicamente o material apresentar alta cristalinidade, apresentar os maiores valores de contração longitudinal e transversal que aliada com o resfriamento não uniforme, facilitou a ocorrência do empenamento.

Em relação aos materiais do molde (VRE e metálico) nota-se que houve um pequeno aumento do empenamento quando as peças foram simuladas em molde VRE. Este fato era esperado devido à diferença na condutividade térmica dos insertos. A baixa condutividade térmica do inserto VRE implica em uma refrigeração não uniforme, ocasionado pontos quentes, ou seja, regiões distantes dos canais de refrigeração onde o resfriamento não é suficiente, como observado no trabalho de (PISTORELLO, 2012). Esta não uniformidade durante o processo de contração do polímero fundido ocasiona o maior empenamento nos insertos VRE, como foi verificado nos resultados das simulações da PA66 mostrados na Figura 43 e Figura 44.

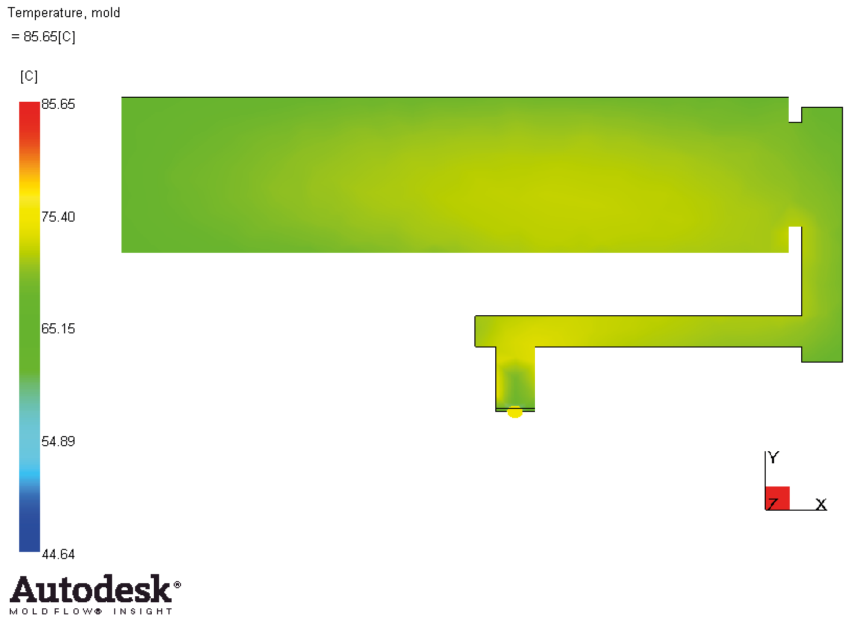



Figura 43 - Resultado da temperatura nas paredes da cavidade na simulação da PA66 em molde metálico, após a extração.

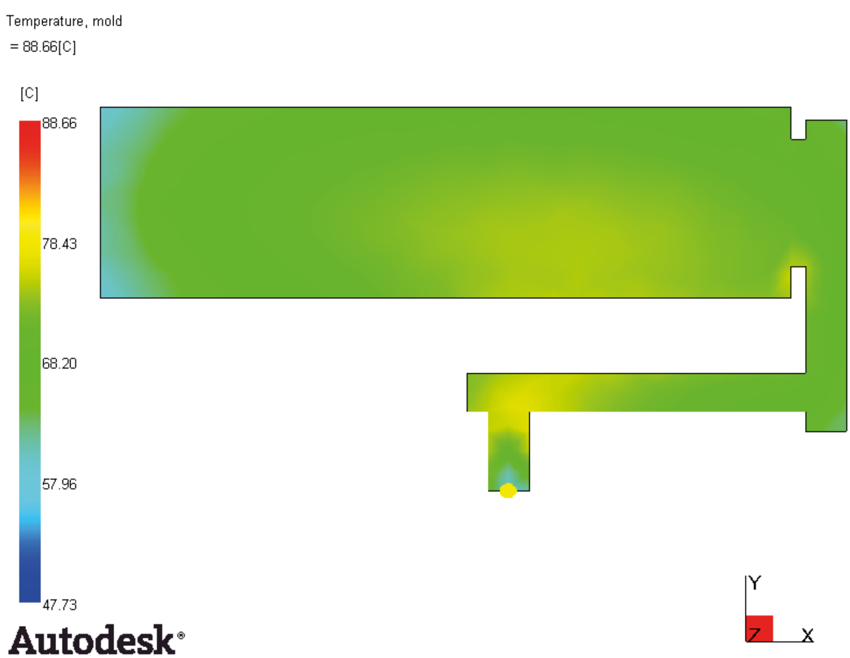



Figura 44- Resultado da temperatura nas paredes da cavidade na simulação da PA66 em molde VRE, após a extração.

Analisando os resultados das simulações, Figura 43 e Figura 44, foi possível observar diferenças de aproximadamente 7°C na superfície na cavidade da peça para o molde metálico e de 17°C de diferença para o molde em resina. Desta forma, é possível observar uma diferença de aproximadamente 10°C entre o molde de resina e o metálico, justificando o maior empenamento no primeiro molde.

## AVALIAÇÃO DO EMPENAMENTO EXPERIMENTAL

Observando o gráfico referente às peças de espessura de 3 mm injetadas em PLA, nos moldes VRE (resina) e metálico (aço), Figura 45, observa-se que para os dois tipos de molde ocorreu um aumento do empenamento devido ao aumento da temperatura do molde.

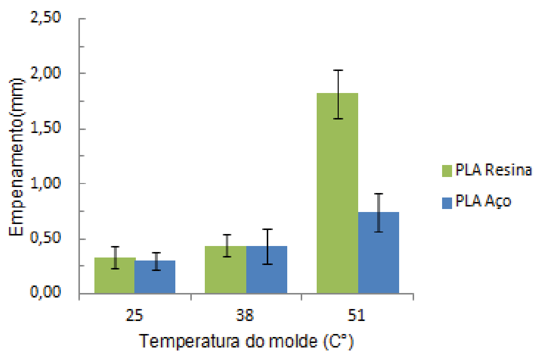



Figura 45 - Empenamento experimental em função da temperatura do molde de peças em PLA no molde VRE.

Nota-se que há um aumento significativo no valor do empenamento experimental das peças injetadas tanto em molde VRE como em aço na temperatura de 51°C em relação às demais, evidenciando assim a influência da temperatura do molde no empenamento. No caso do molde VRE quando a temperatura da superfície da cavidade subiu de 25°C para 51°C, aumentou cerca de cinco vezes o empenamento quando comparado à temperatura de 25°C. Este fato pode ser explicado devido ao PLA usado na prática ter alcançado temperaturas próximas às de transição vítrea do polímero, quando injetado no molde VRE. Em função da baixa condutividade térmica do material do molde VRE, é possível que a peça injetada tenha sido extraída do molde mais quente nesta temperatura (51°C) e por isso contraiu mais após moldagem, justificando o resultado. No caso do molde metálico isso não ocorreu em função da rápida solidificação causada pela elevada condutividade térmica do aço 1045, verificado pela diferença significativa entre os dois materiais na alta temperatura do molde.

Apesar dos parâmetros de moldagem ter sido diferentes entre os utilizados na

simulação (valores de entrada) e na prática (ajustados na injetora) comparando as peças injetadas em PLA, notou-se que para as temperaturas baixa e média do molde, os resultados de empenamento apresentados pelo software foram relativamente próximos dos obtidos na prática. Isto ocorreu tanto para o molde VRE como o metálico, chegando a uma diferença de aproximadamente 2% no caso de temperatura do molde de 25°C em VRE, como é mostrado na Tabela 16.

Em relação às peças injetadas em molde metálico, não há um aumento significativo do empenamento experimental em relação às temperaturas de 51°C e 38°C. Já quando comparada às temperaturas de 25°C e 51°C houve um aumento significativo de mais de duas vezes no empenamento para as peças injetadas em aço.

A Tabela 16 mostra os valores em mm e a variação dos resultados simulados e experimentais para as peças injetadas em PLA e foram calculados a partir da equação (3):

$$Variação = \frac{E_s - E_e}{E_e} \qquad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$E_s$ – Valor do empenamento simulado;

$E_e$ – Valor do empenamento experimental.

| $T_w$ (°C) | Molde | Simulado (mm) | Experimental (mm) | Variação (%) |
|---|---|---|---|---|
| 25 | VRE | 0,39 | 0,33 | 18,18 |
| | Aço | 0,37 | 0,30 | 23,23 |
| 38 | VRE | 0,43 | 0,44 | -2,28 |
| | Aço | 0,32 | 0,43 | -25,58 |
| 51 | VRE | 0,22 | 1,82 | -87,91 |
| | Aço | 0,20 | 0,74 | -72,97 |

Tabela 16 - Valores do empenamento nas peças injetadas em PLA.

O gráfico da Figura 46 e mostra o comportamento experimental de peças injetadas em PA66 em molde VRE e metálico.

Para as peças injetadas em VRE, nota-se entre as temperaturas de 40 e 55°C há um aumento significativo de aproximadamente 59% no empenamento nas peças injetadas em VRE.

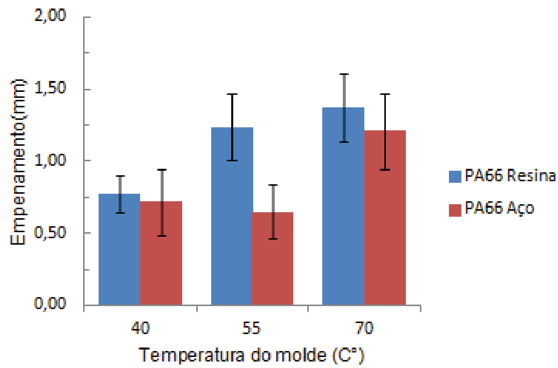



Figura 46 - Empenamento e experimental em função da temperatura do molde de peças em PA66 em inserto VRE.

Para as peças injetadas aço, houve um aumento significativo de quase duas vezes quando a temperatura do molde aumentou de 55°C para 70°C.

Comparando os resultados das peças injetadas em molde VRE e metálico, não houve diferenças significativas nas temperaturas de 40°C e 70°C, respectivamente. Na temperatura de 55°C do molde há um aumento significativo de quase duas vezes no empenamento no molde VRE em relação ao metálico.

A Tabela 17 mostra os valores do empenamento das peças simuladas e injetadas em PA66.

| ***$T_w$* (°C)** | ***Molde*** | ***Simulado (mm)*** | ***Experimental (mm)*** | ***Variação (%)*** |
|---|---|---|---|---|
| 40 | VRE<br>Aço | 2,07<br>2,01 | 0,78<br>0,72 | 165,38<br>179,17 |
| 55 | VRE<br>Aço | 2,09<br>2,07 | 1,24<br>0,65 | 68,55<br>218,46 |
| 70 | VRE<br>Aço | 2,13<br>2,12 | 1,38<br>1,21 | 54,35<br>75,21 |

Tabela 17 - Valores do empenamento nas peças injetadas em PA66.

As menores diferenças entre os valores simulados e experimentais para as peças em PA66 são notadas na alta temperatura do molde, verificadas, tanto para o molde VRE quanto para o metálico.

É possível observar diferenças menores no valor do empenamento simulado nas peças injetadas em molde VRE para todas as temperaturas molde. Este resultado é corroborado no trabalho de Silva (2009), onde este autor observou menores diferenças no valor do empenamento simulado e em um molde não convencional quando comparado a um metálico.

A Tabela 18 mostra o comparativo dos valores do empenamento das peças injetadas em PLA e PA66

| $T_w$ | Molde | PLA (mm) | PA66 (mm) | Variação (%) |
|---|---|---|---|---|
| Baixa | VRE | 0,33 | 0,78 | 136,36 |
| | Aço | 0,30 | 0,72 | 140 |
| Média | VRE | 0,44 | 1,24 | 80 |
| | Aço | 0,43 | 0,65 | 22 |
| Alta | VRE | 1,82 | 1,38 | -24,18 |
| | Aço | 0,74 | 1,21 | 63,51 |

Tabela 18 - Valores do empenamento experimental de peças injetadas em PLA e PA66.

É possível observar que somente na injeção da PA66 na temperatura alta do molde VRE, o valor médio do empenamento foi maior para o PLA. Em todas as outras condições os valores foram maiores nas peças injetadas em PA66. Isto se deve ao fato da PA66 ser um material altamente cristalino, enquanto o PLA um polímero de baixa cristalinidade, como já mencionado.

## AVALIAÇÃO DA CONTRAÇÃO EXPERIMENTAL

A Figura 47 mostra a contração transversal do PLA em molde VRE e metálico.

Nas peças em PLA injetadas no molde VRE, nota-se que houve um aumento da contração transversal com o aumento da temperatura do molde.

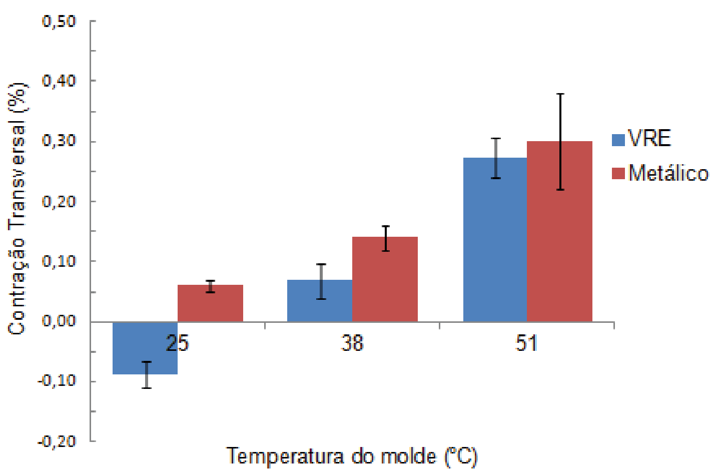



Figura 47 - Contração transversal em função da temperatura do molde de peças em PLA em molde VRE e metálico.

Os maiores valores de contração transversal resultantes nas peças injetadas não eram esperados para o molde metálico, mas sim para o molde VRE. Isto porque devido à baixa condutividade térmica do molde VRE, era de se esperar que o PLA demorasse mais para resfriar e consequentemente ter mais tempo para as moléculas se arranjarem de forma ordenada aumentando o grau de cristalinidade como observado no trabalho de Pfeifer, (2013) e resultando em maiores valores de contração do material. Acredita-se, no entanto, que os valores menores de contração das peças injetadas no molde VRE, incluindo-se a contração negativa na temperatura do molde de 25°C, ocorreram devido às altas pressões na cavidade, além da resina possuir menor módulo de elasticidade que o aço, e consequentemente maior deformação e também ao fato do PLA ser um material de baixa cristalinidade e consequentemente baixa contração.

A Figura 48 mostra a contração longitudinal de peças injetadas em PLA em molde VRE e metálico.

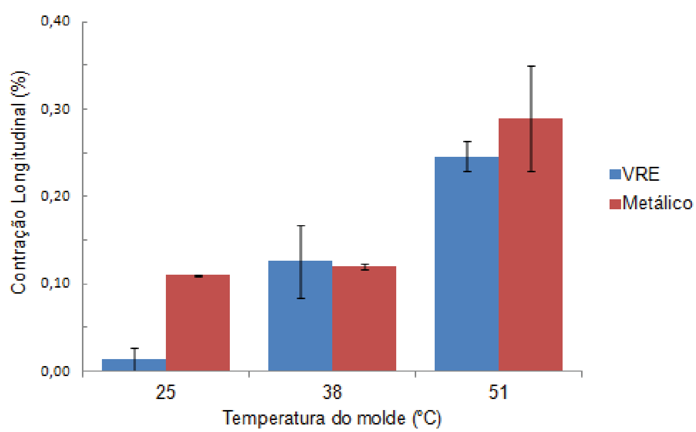



Figura 48 - Contração longitudinal em função da temperatura do molde de peças em PLA em molde VRE e metálico.

Nas peças injetadas em molde VRE não houve contração longitudinal negativa na temperatura de 25°C como ocorreu na contração transversal. Este resultado corrobora com o constatado por Malloy (2010) que afirma que materiais plásticos puros tendem a encolher mais ao longo da direção do fluxo e menos na direção perpendicular. A Tabela 19 mostra os valores em % para as contrações longitudinal e transversal para ambos os materiais do molde para a PLA.

| $T_w$ (°C) | Molde | Transversal (%) | Longitudinal (%) |
|---|---|---|---|
| 25 | VRE<br>Aço | -0,09<br>0,06 | 0,01<br>0,11 |
| 38 | VRE<br>Aço | 0,07<br>0,14 | 0,13<br>0,12 |
| 51 | VRE<br>Aço | 0,27<br>0,30 | 0,25<br>0,29 |

Tabela 19 - Valores das contrações transversal e longitudinal para o PLA.

A Figura 49 mostra a contração transversal de peças injetadas em PA66 em molde VRE e metálico.

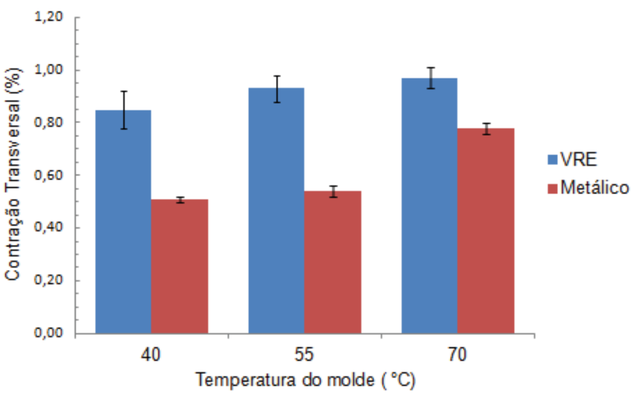



Figura 49 - Contração transversal em função da temperatura do molde de peças em PA66 em molde VRE e metálico.

No caso das peças em PA66 injetadas em molde VRE, o gráfico mostra que não houve diferença significativa entre as três temperaturas do molde. Já nas peças injetadas em aço, somente na temperatura de 70°C a contração transversal resultou em um valor maior.

Quando se compara os valores da contração transversal dos dois materiais do molde, em uma mesma temperatura do molde, os resultados indicam maiores valores de contração nas peças injetadas no molde VRE, para todas as temperaturas do molde. Neste caso, devido ao fato da poliamida possuir maior valor de contração transversal (anunciado pelo fabricante) do que o PLA, a contração predominou sobre a expansão do molde, não havendo a contração negativa. Além de o molde VRE apresentar um resfriamento mais lento do que o metálico, aumentando a cristalinidade e consequentemente a contração, conforme citado por (CRUZ, 2013).

A Figura 50 mostra a contração longitudinal das peças injetadas em PA66 em molde VRE e metálico.

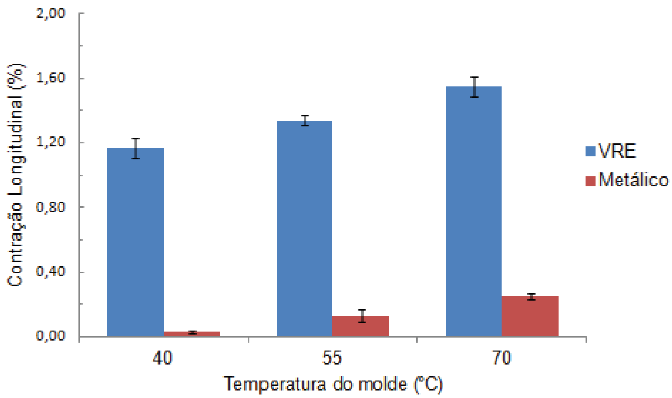



Figura 50 - Contração longitudinal em função da temperatura do molde de peças em PA66 em inserto VRE e metálico.

Nas peças moldadas em VRE, em todas as temperaturas do molde apresentam aumento significativo da contração longitudinal com o aumento da temperatura do molde, chegando ao valor máximo de 1,54% na temperatura de 70°C.

Já para as peças injetadas em molde 1045, o aumento da temperatura do molde, aumentou a contração em todas as temperaturas. Ao contrário que ocorreu no molde VRE, os valores da contração longitudinal foram menores do que os da contração transversal. A Tabela 20 mostra os valores em % para as contrações longitudinal e transversal para ambos os materiais do molde para a PA66.

| ***$T_w$* (°C)** | ***Molde*** | ***Transversal* (%)** | ***Longitudinal* (%)** |
|---|---|---|---|
| 40 | VRE<br>Aço | 0,85<br>0,51 | 1,17<br>0.03 |
| 55 | VRE<br>Aço | 0,93<br>0,54 | 1,34<br>0,13 |
| 70 | VRE<br>Aço | 0,97<br>0,78 | 1,54<br>0,25 |

Tabela 20 - Valores das contrações transversal e longitudinal para o PA66.

# CONCLUSÃO

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou primeiramente por meio de simulação CAE o empenamento de peças injetadas em PLA e PA66 em insertos VRE e em aço 1045. Nesta etapa foram utilizadas diferentes espessuras da peça e diferentes temperaturas da superfície do inserto. E experimentalmente foram avaliadas peças injetadas em PLA e PA66 em insertos fabricados em VRE e aço 1045 onde foi avaliado o empenamento e contração para diferentes temperaturas da superfície dos insertos.

Na simulação CAE verificou-se que para as peças injetadas em PA66 o aumento da temperatura da superfície do molde aumentou o empenamento das peças, de forma não significativa, já para o PLA, diminuiu de forma não significativa.

Em relação às espessuras das peças simuladas, verificou-se que para as peças simuladas em PA66, quanto menor a espessura da peça maior foi o empenamento observado.

Ainda na simulação computacional, comparando os diferentes materiais, o maior valor para o empenamento foi observado na PA66, seguido do PLA.

Em relação às peças injetadas em PLA em inserto VRE e metálico, foi observado que para ambos os materiais do molde um aumento do empenamento devido ao aumento da temperatura do molde, fato também encontrado na simulação. Ainda houve um aumento significativo no valor do empenamento experimental das peças injetadas em molde VRE na temperatura de 51°C em relação às demais, aumentando cerca de cinco vezes o empenamento quando comparado à temperatura de 25 °C.

Comparando as peças injetadas com a simulação, notou-se que para as temperaturas baixa e média do molde, há uma predição melhor do empenamento do que em temperaturas altas, para peças injetadas em PLA tanto em molde VRE como metálico, chegando a uma diferença de aproximadamente 2% no caso de temperatura do molde de 25°C em VRE.

Em relação às peças injetadas em molde metálico, não há um aumento significativo do empenamento experimental em relação às temperaturas de 51°C e 38°C. Já quando se comparada às temperaturas de 25°C e 51°C houve um aumento significativo de mais de duas vezes no empenamento para as peças injetadas em aço.

Para as peças injetadas em PA66 em molde VRE nota-se que não há aumento significativo no empenamento experimental entre as temperaturas de 55 e 70°C. Já entre as temperaturas de 40 e 55°C há um aumento significativo de aproximadamente 59% nas peças injetadas em VRE.

Em relação aos resultados simulados verifica-se que há uma melhor predição do empenamento quanto maior a temperatura do molde para peças injetadas em PA66 em molde VRE.

Já para as peças injetadas aço, houve um aumento significativo de quase duas

vezes quando a temperatura do molde aumentou de 40°C para 70°C.

Comparando os resultados das peças de PA66 injetadas em molde VRE e metálico, não há diferenças significativas nas temperaturas de 40 e 70°C. Na média temperatura do molde há um aumento significativo de quase duas vezes no empenamento no molde VRE em relação ao metálico.

Nas peças injetadas em VRE, nota-se que há um aumento significativo da contração transversal com o aumento da temperatura do molde. E também é observada uma contração negativa na temperatura do molde de 25°C, esta expansão é resultado de uma possível expansão do molde VRE devido às altas pressões na cavidade, além da resina possuir menor módulo de elasticidade que o aço, e consequentemente maior deformação e também ao fato do PLA ser um material de baixa cristalinidade e consequentemente baixa contração.

Nas peças injetadas em PA66, quando se compara os valores da contração transversal dos dois materiais do molde, verificam-se valores maiores de contração nas peças injetadas em VRE.

Nas peças moldadas em VRE, em todas as temperaturas do molde apresentam aumento significativo da contração longitudinal com o aumento da temperatura do molde, chegando ao valor máximo de 1,54% na temperatura de 70°C, superando os valores da contração transversal em todas as temperaturas do molde.

Já para as peças injetadas em molde 1045, o aumento da temperatura do molde, aumentou significativamente a contração longitudinal em todas as temperaturas. Ao contrário que ocorreu no molde VRE, os valores da contração longitudinal foram menores do que os da contração transversal.

## RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar o comportamento de outros biopolímeros em relação ao empenamento e contração, que possam ser utilizados para a substituição de *commodities*.

Avaliar as tensões residuais das amostras do PLA 3251D e da PA66 nas diferentes temperaturas do molde.

Analisar experimentalmente os efeitos das diferentes espessuras de peças no empenamento e contração de peças com a mesma geometria.

# REFERÊNCIAS

ALVES, L. A. **Considerações sobre as propriedades mecânicas da blenda poliamida 6.6/polietileno de baixa densidade (60%/40%) através do ensaio de tração**. Monografia (Tecnólogo em Produção com Ênfase em Plásticos). 2009. 66 f. Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2009.

ALVES, P. S. F. F. **Shrinkage and Warpage Behaviour on Injection Moulding Parts**. Dissertação (Mestrado em Projecto e Fabrico de Moldes). 2008. 120f. Universidadedo Minho, Braga, 2008.

ASTM D955. Standard Test Method of Measuring Shrinkage from Mold Dimensions of Thermoplastics. 2001.

AHRENS, C.H., FERREIRA, C.V., PETRUSH, G., CARVALHO, J.D., SANTOS, J.R.L.D., SILVA, J.V.L.D. e VOLPATO, N. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

BLASS, Arno. **Processamento de polimeros**. 2a ed. rev. e ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1988. 313p. (Serie Didatica).

BOCIAGA, E. *et al*. Warpage of injection moulded parts as the result of mould temperature difference. **Archives of Materials Science and Engineering**. v.44, 2010.

BOM, Ricardo Pedro; LEÃES, Vinícius Severo. Avaliação da influência da diferença de temperatura entre as placas de um molde de injeção no empenamento de peças injetadas. **Anais do 62º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.** [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 665-673, 2007.

BRITO, A. M.; MATOS, A.; MENDES, S. S. Sistema de controlo de temperatura. In: **Manual do projectista para moldes de injecção de plásticos.** 51f. v.7. Portugal: Centimfe, 2004.

BRYCE, D. M. Plasctic Injection Molding: Mold Design and Construction Fundamentals. Michigan: Societyof Manufacturing Engineers, 1998.

CANEVAROLO, S. V.; Ciência dos Polímeros: um curso básico para tecnólogos e engenheiros. 1°ed. São Paulo: Artliber, 2002.

CARRASCO, F. *et al*. Processing of poly(lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. **Polymer Degradation and Stability**. v.95, p.116-125, 2009.

CAVALHEIRO, A., Z. **Influência dos parâmetros de moldagem na estrutura e propriedade de peças de paredes espessas e finas de polipropileno isotático injetadas em moldes-protótipo fabricados por vazamento de resina epóxi.** 2007. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5º ed. São Paulo: LTC, 2002.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Materials science and engineering: an introduction. 2007.

CRUZ, L.C.A. Estudo da cinética de cristalização do Polifluoreto de vinilideno (PVDF). Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

DERENIEVICKI, O. F. **Procedimento para Testar Resinas Poliméricas para a Fabricação de Moldes-Protótipo Usinados**. 2007. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

FERREIRA, J. C.; MATEUS, A. *Studies of rapid soft tooling with conformal cooling channels for plastic injection moulding.* ***Journal of Materials Processing Technology.*** v. 142. p. 508-516. 2003.

FISCHER, J. M. **Handbook of molded part shrinkage and warpage**. 1º ed. Norwich-EUA, Ed. Plastics Design Library, 2003.

FRITZ, H.; LARPSURIYAKUL, P. Warpage and Countermeasure for Injection-Molded In-Mold Labeling Parts. Polymer Engineering and Science. V51. P. 411-418, 2010.

GARLOTTA, D. A Literature Review of Poly(Lactic Acid). **Journal of polymers and the environment**. V.9, p. 63-84, 2002.

GASTROW, Hans. **Injection molds:** 102 proven designs. Nova Iorque: McMillan, 1983.

HARADA, J. e UEKI, M. M. Injeção de Termoplásticos - Produtividade com Qualidade. 1º ed. São Paulo: Artliber, 2012.

HASSAN, H. *et al*. Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding. Appllied Thermal Engineering.V.30, p. 1547-1557, 2010.

HUNTSMAN. CW 436 Material datasheet. 2011.

JESUS, M. S. **Desenvolvimento de um compósito polímero metal a base de epóxi para aplicações em moldes rápidos**. 2005.102f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Florianópolis, 2005.

KOVÁCS, J.G. Construction of Pre-Deformed Shapes for Rapid Tooling in Injection Molding. **Wiley Interscience.** V.239. p259-265, 2006.

LANXESS. Part and Mold Design: A Design Guide. 2007.

LATI. Dimensional Molding Shrinkages of Thermoplastic Parts. 2008.

LARPSURIYAKUL, P.; FRITZ, H. Warpage and Countermeasure for Injection-MoldedIn-Mold Labeling Parts. **Polymer Engineering and Science**. 2011.

LEÃES, V. S. **Avaliação da influência da diferença de temperatura entre as placas de um molde de injeção no empenamento de peças injetadas**. 2008. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2008.

MALOY, ROBERT A. Plastic Part Design for injection molding: An introduction, Carl Hanser Verlag, 1994

MATWEB. Material Property Data, 2014. Disponivel em: <http://www.matweb.com/>. Acesso em: 10 Mai 2014.

MOLDFLOW. Autodesk Moldflow Inside Help. 2012.

MOLDFLOW PTY LTD.  Warpage Design Principles: Making Accurate Placstic Parts. 1991.

NATUREWORKS. **PLA 3251D Material datasheet**. 2012.

OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional.** 2004. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais). Universidade Federal do Paraná, 2004, Curitiba.

PEIXOTO, F. L. **Aplicação do processo de sobreinjeção em insertos de termoplástico utilizando moldes de fabricação rápida**. 2009. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PEREIRA, L. E. C. **Análise por sistemas CAE de pontos de injeção de seção Retangular para moldes fabricados em resina termofixa**. 2007. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007

PFEIFER, D.,C.**Estudo de propriedades mecânicas e caracterização da região de linha de solda de um biopolímero injetado em molde metálico e molde de fabricação rápida (VRE)**. 2013. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PISTORELLO, R. A. **Avaliação de métodos de projeto de sistemas de refrigeração aplicados a moldes fabricados por vazamento de resina epóxi (VRE), através de estudos em sistema CAE**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2012.

PÖTSCH, G.; MICHAELI, W. **Injection molding**: an introduction. 195f. Munich: Hanser, 1995.

RAHIMI, M.; ESFAHANIAN, M.; MORADI, M. Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding. **Journal of Materials Processing Technology**.

REES, H. Mold Engineering, Chapter 8 – Plastic Shinkage, Carl Hanser Verlag, 1995

SABINO NETTO, A. C. **Desenvolvimento de compósito de resina epóxi e fibras curtas de aço para fabricação rápida de moldes para injeção de termoplásticos**. 224f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica),Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SARAIVA, V. M.; SOARES, R. Técnicas não convencionais: métodos rápidos de fabricação. In: **Manual do projectista para moldes de injecção de plásticos.** v.9. 2007.

SELLÉS, M.A.; SANCHES-CABALLERO, S.; PEREZ-BERNABEU. Analysis and review of different tools to calculate the production economics in injection molding. **Procedia Technology**. V12. P.439- 441, 2014.

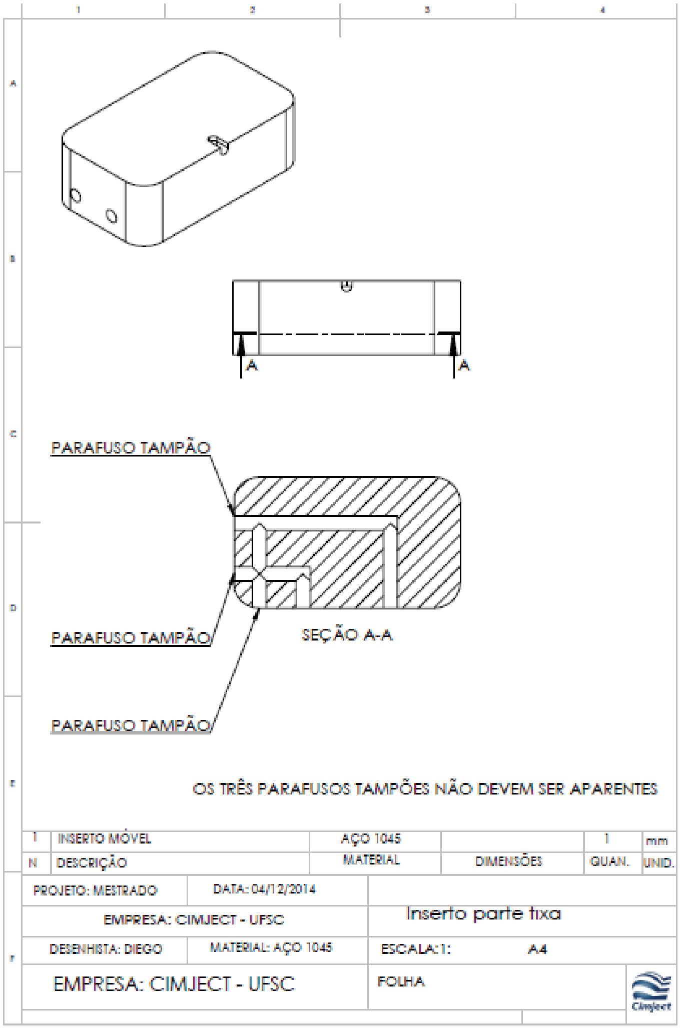
SILVA, Sérgio Luis. **Sistemática para o projeto do sistema de refrigeração de moldes para injeção de polímeros**. 2009. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

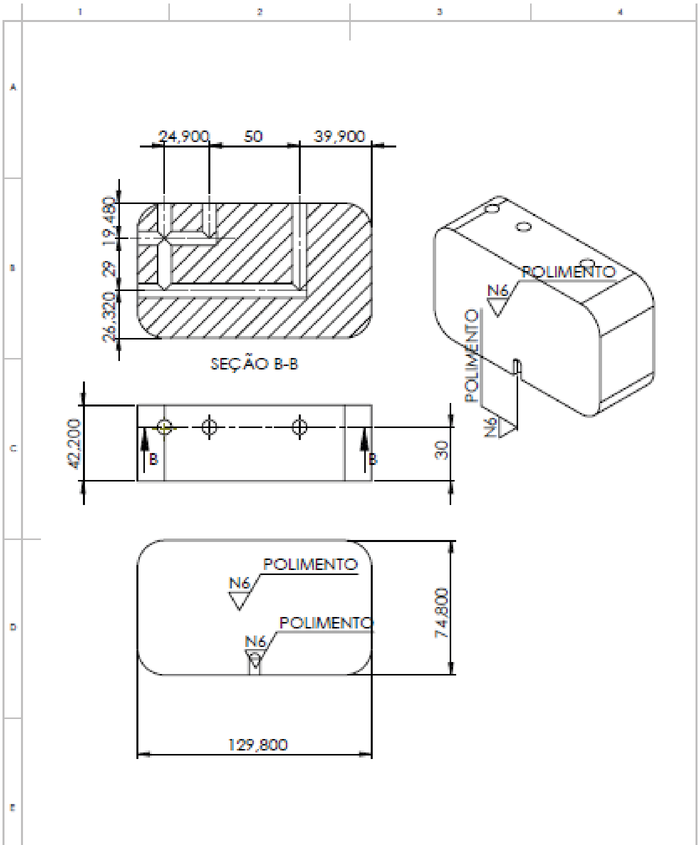
VIANA, J. C.; MARTINS, C. I. **Processamento de polímeros II**: moldação por injeção. Departamento de Engenharia de Polímeros. Universidade do Minho, Portugal. Maio. 2008. 92 slides. Apresentação De Slides.

Wilkinson R. *et al*. Dupont: Engineering Polymers: “The top tem” Injection Molding Problens. 2007.

ZÖLLNER, O. *Optimized mould temperature control. **Applied technology information***. 1104. 1997.

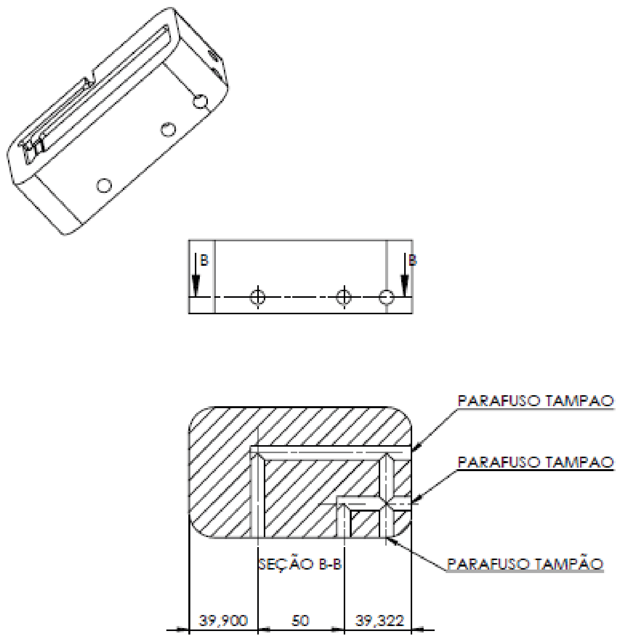
# ANEXO A – PROJETO DOS INSERTOS






| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | INSERTO MÓVEL | AÇO 1045 | | 1 | mm |
| N | DESCRIÇÃO | MATERIAL | DIMENSÕES | QUAN. | UNID. |

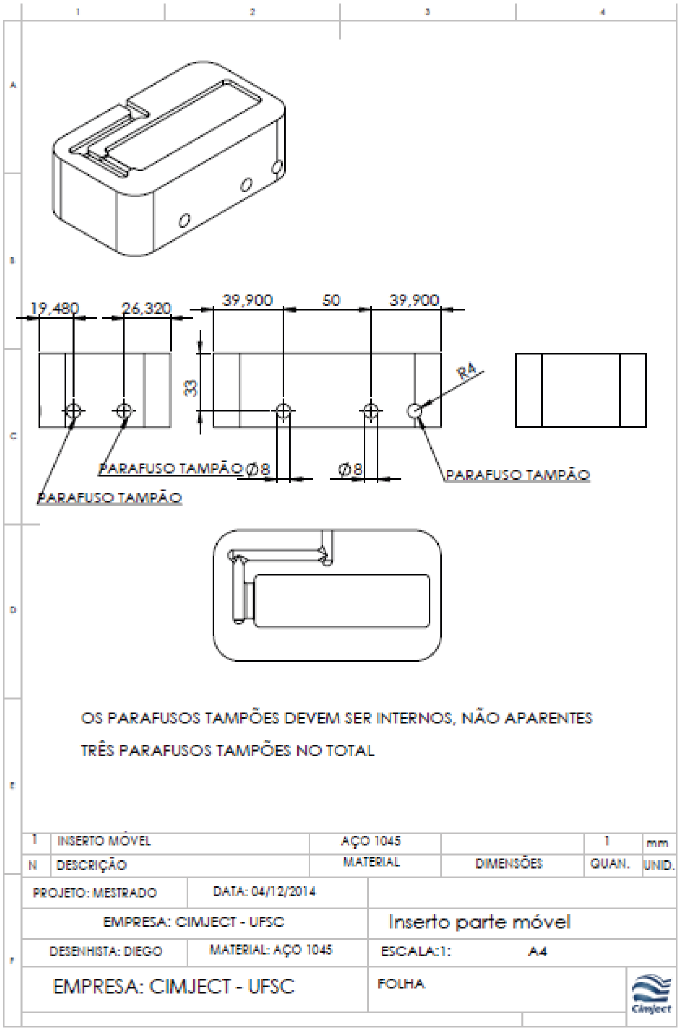
| | | | |
|---|---|---|---|
| PROJETO: MESTRADO | DATA: 04/12/2014 | | |
| EMPRESA: CIMJECT - UFSC | | Inserto parte fixa | |
| DESENHISTA: DIEGO | MATERIAL: AÇO 1045 | ESCALA:1: | A4 |
| EMPRESA: CIMJECT - UFSC | | FOLHA | Cimject |

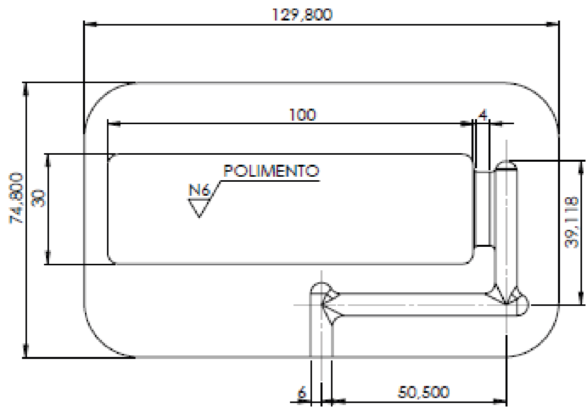



TRÊS PARAFUSOS TAMPÕES NÃO APARENTES

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | INSERTO MÓVEL | AÇO 1045 | | 1 | mm |
| N | DESCRIÇÃO | MATERIAL | DIMENSÕES | QUAN. | UNID. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| PROJETO: MESTRADO | DATA: 04/12/2014 | | |
| EMPRESA: CIMJECT - UFSC | | Inserto parte móvel | |
| DESENHISTA: DIEGO | MATERIAL: AÇO 1045 | ESCALA:1: | A4 |
| EMPRESA: CIMJECT - UFSC | | FOLHA | Cimject |


19,480
26,320
39,900
50
39,900
33
R4
PARAFUSO TAMPÃO
PARAFUSO TAMPÃO
Ø8
Ø8
PARAFUSO TAMPÃO
OS PARAFUSOS TAMPÕES DEVEM SER INTERNOS, NÃO APARENTES
TRÊS PARAFUSOS TAMPÕES NO TOTAL
1 INSERTO MÓVEL AÇO 1045 1 mm
N DESCRIÇÃO MATERIAL DIMENSÕES QUAN. UNID.
PROJETO: MESTRADO
DATA: 04/12/2014
EMPRESA: CIMJECT - UFSC
Inserto parte móvel
DESENHISTA: DIEGO
MATERIAL: AÇO 1045
ESCALA:1:
A4
EMPRESA: CIMJECT - UFSC
FOLHA




POLIMENTO EM TODA A SUPERFÍCIE INDICADA

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | INSERTO MÓVEL | AÇO 1045 | | 1 | mm |
| N | DESCRIÇÃO | MATERIAL | DIMENSÕES | QUAN. | UNID. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| PROJETO: MESTRADO | DATA: 04/12/2014 | | |
| EMPRESA: CIMJECT - UFSC | | Inserto parte móvel | |
| DESENHISTA: DIEGO | MATERIAL: AÇO 1045 | ESCALA:1: | A4 |
| EMPRESA: CIMJECT - UFSC | | FOLHA | |

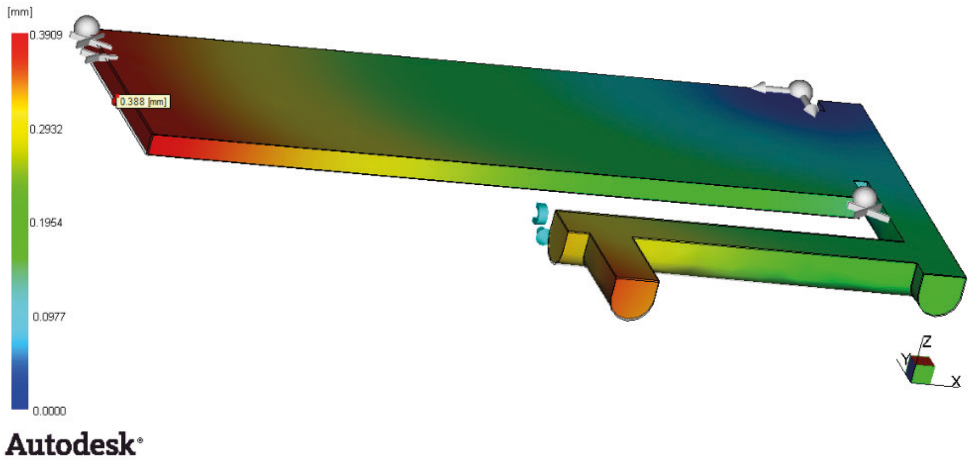



Figura 51 - Resultado do empenamento simulado para o PLA em molde VRE a 25°C para espessura de 3 mm.

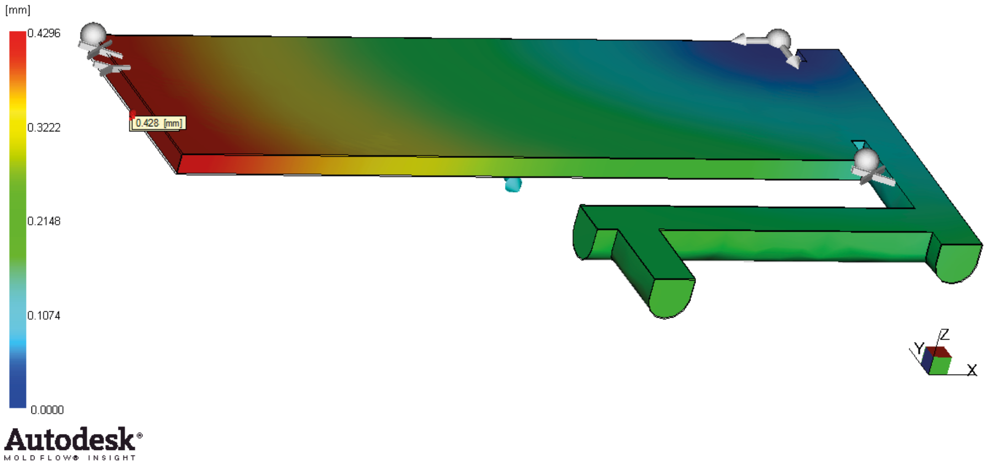



Figura 52 - Resultado do empenamento simulado para o PLA em molde VRE a 38°C para espessura de 3 mm.

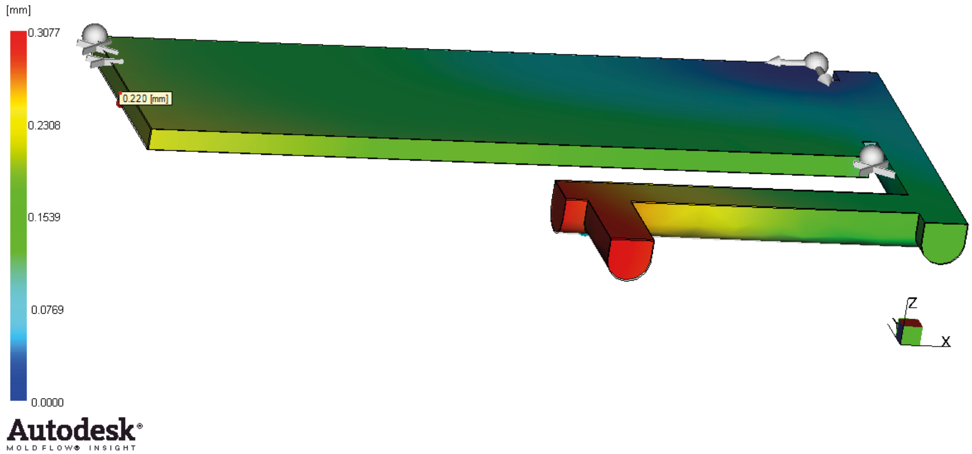



Figura 53 - Resultado do empenamento simulado para o PLA em molde VRE a 51°C para espessura de 3 mm.

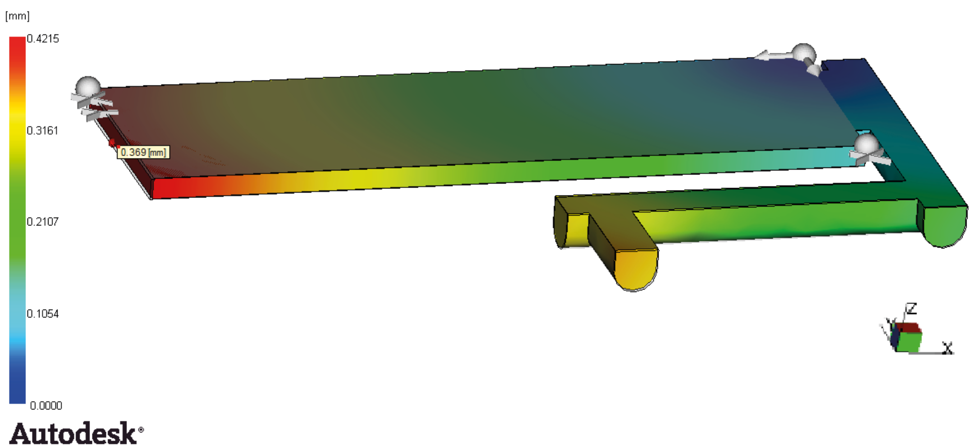



Figura 54 - Resultado do empenamento simulado para o PLA em molde metálico a 25°C para espessura de 3 mm.

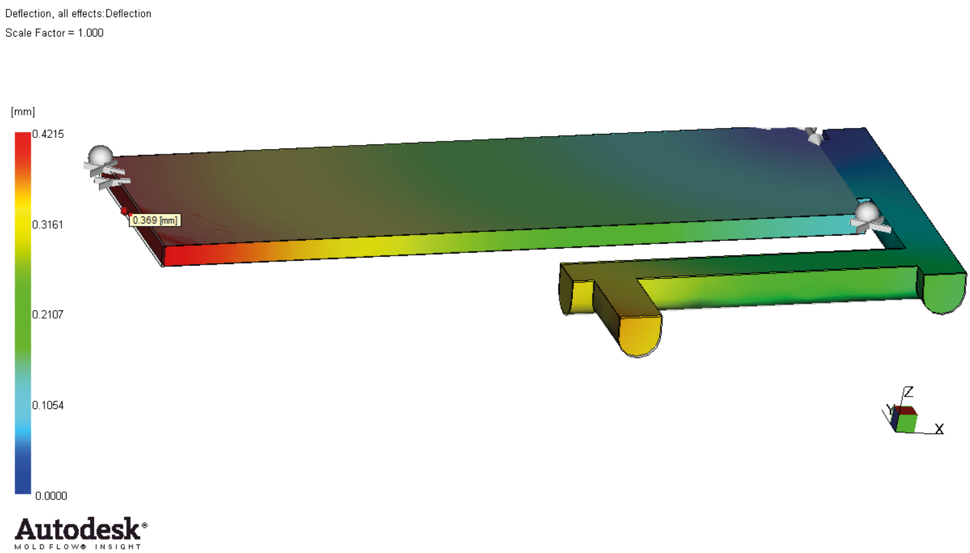



Figura 55 - Resultado do empenamento simulado para o PLA em molde metálico a 38°C para espessura de 3 mm.

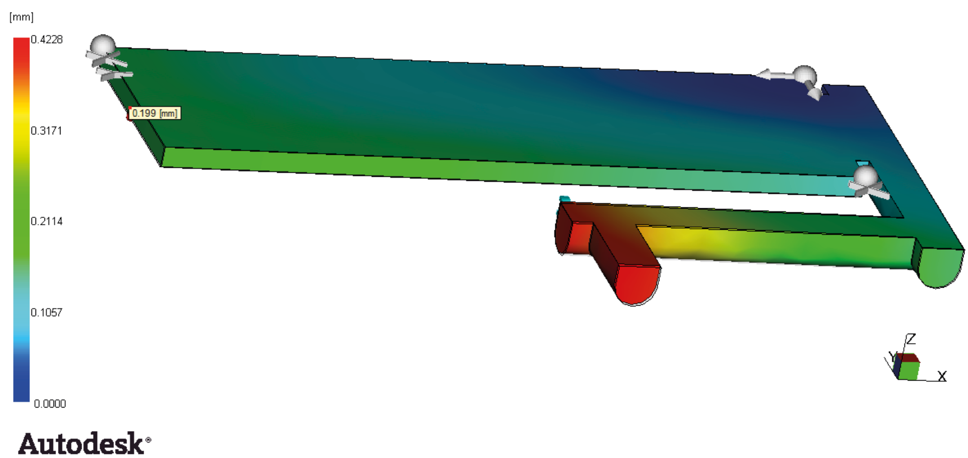



Figura 56 - Resultado do empenamento simulado para o PLA em molde metálico a 51°C para espessura de 3 mm.

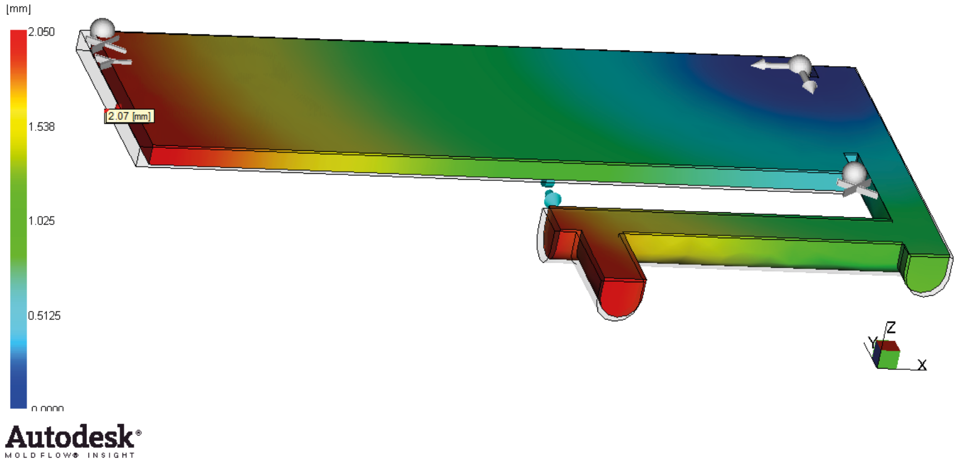



Figura 57 - Resultado do empenamento simulado para o PA66 em molde VRE a 40°C para espessura de 3 mm.

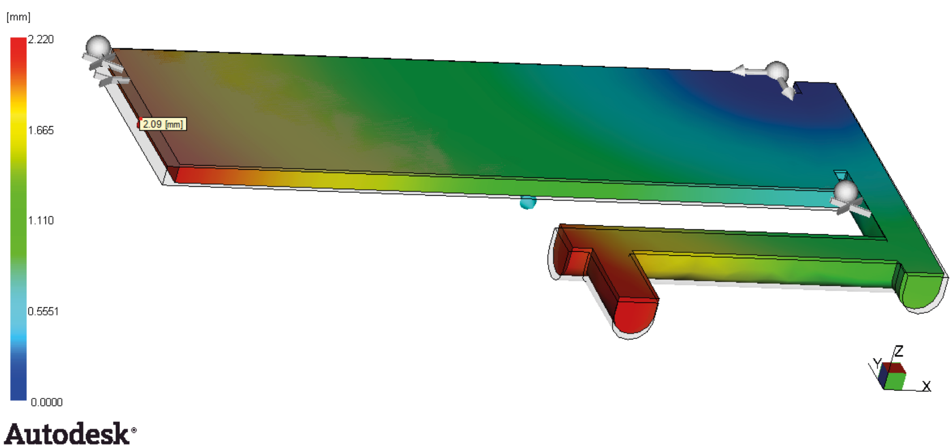



Figura 58 - Resultado do empenamento simulado para o PA66 em molde VRE a 55°C para espessura de 3 mm.

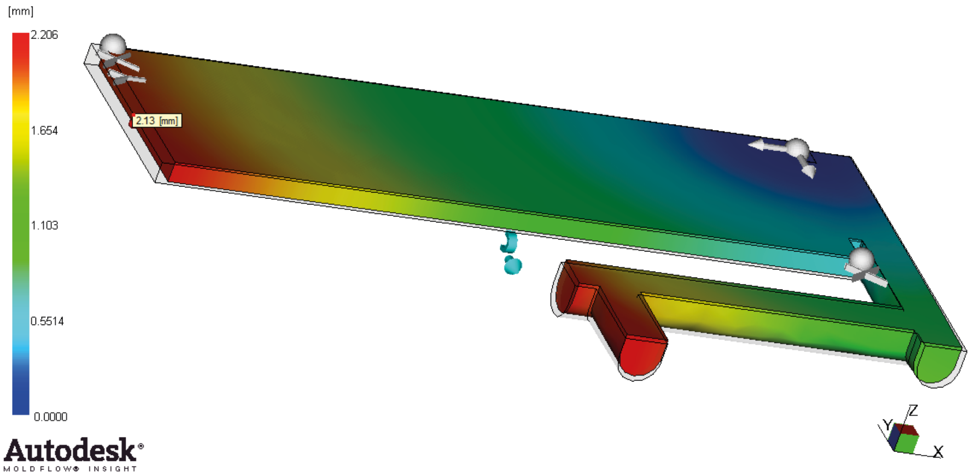



Figura 59 - Resultado do empenamento simulado para o PA66 em molde VRE a 70°C para espessura de 3 mm.

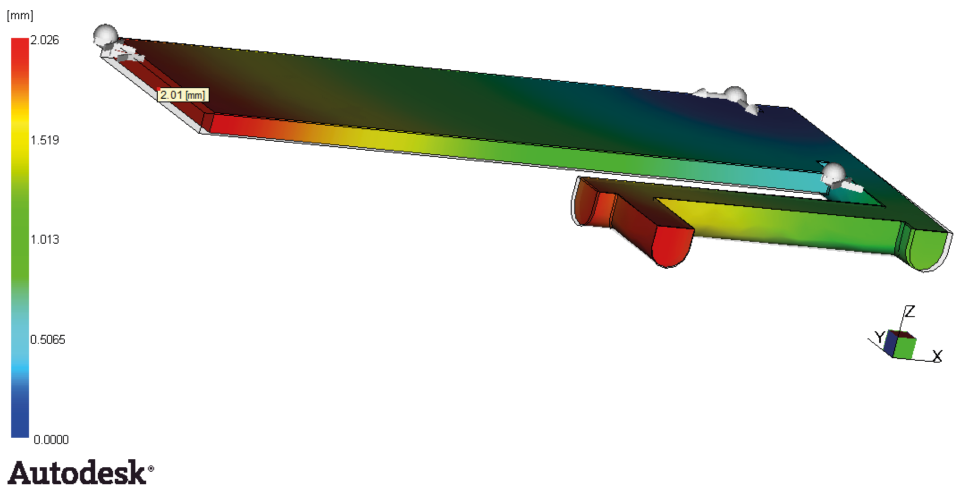



Figura 60 - Resultado do empenamento simulado para o PA66 em molde metálico a 40°C para espessura de 3 mm.

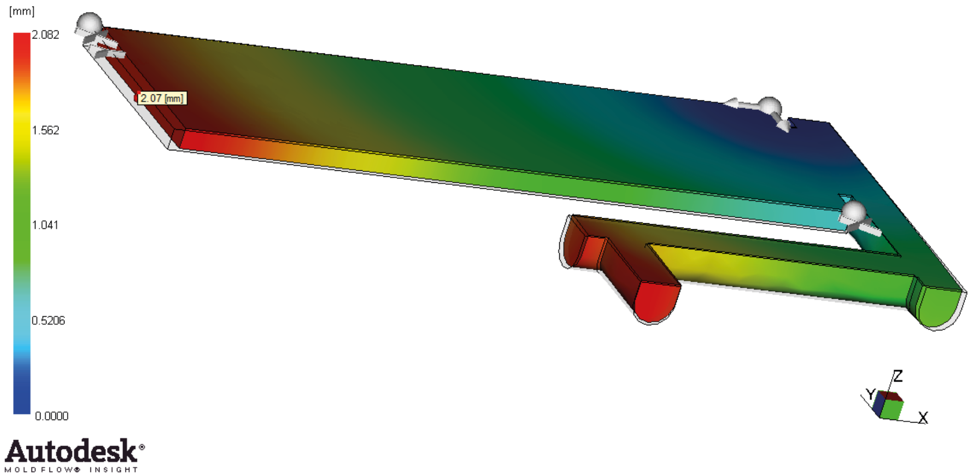



Figura 61 - Resultado do empenamento simulado para o PA66 em molde metálico a 55°C para espessura de 3 mm.

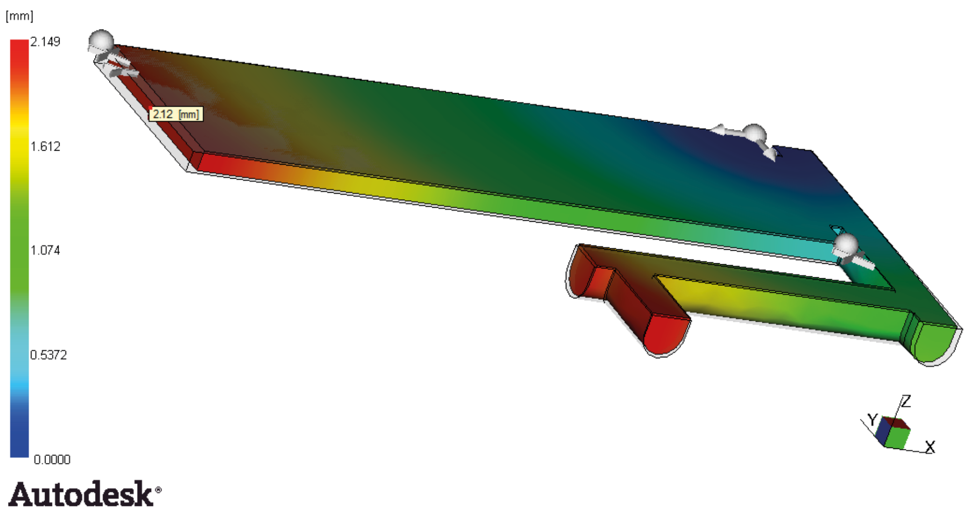



Figura 62 - Resultado do empenamento simulado para o PA66 em molde metálico a 70°C para espessura de 3 mm.

# AVALIAÇÃO DA CONTRAÇÃO E DO EMPENAMENTO DE PLA E PA66 INJETADOS EM MOLDE DE FABRICAÇÃO RÁPIDA (VRE) E EM MOLDE METÁLICO


www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

@atenaeditora

www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora

Ano 2023

# AVALIAÇÃO DA CONTRAÇÃO E DO EMPENAMENTO DE PLA E PA66 INJETADOS EM MOLDE DE FABRICAÇÃO RÁPIDA (VRE) E EM MOLDE METÁLICO


www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena Editora
Ano 2023